

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Analýza topografie povrchů vytvořených hydroabrazivní dezintegrací rotujících
obrobků

Surface Topography Analysis Created by Hydroabrasive Disintegration of Rotating
Workpieces

Student:

Pavel Vacek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, PhD

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Vacek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: Analýza topografie povrchů vytvořených hydroabrazivní dezintegrací
rotujících obrobků
Surface Topography Analysis Created by Hydroabrasive Disintegration
of Rotating Workpieces

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu problematiky.
2. Definování nedostatků a návrh řešení problému.
3. Experimentální metodika a experimentální ověření.
4. Diskuse a konfrontace výsledků se stávající literaturou.
5. Nový přístup k řešeným problémům.

Seznam doporučené odborné literatury:

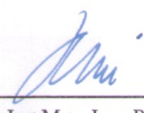
- [1] VASILKO, K.; HRUBÝ, J.; LIPTÁK, J. *Technológia obrábania a montáže*. Bratislava : Alfa, 1991. 494 s. ISBN 80-05-00807-4.
[2] VASILKO, K.; et al. *Nové materiály a technológie ich spracovania*. 1. vyd. Bratislava : Alfa, 1990. 365 s. ISBN 80-05-00661-6.
[3] HLOCH, S.; VALÍČEK, J. *Teoretické spracovanie a základný projekt prevádzkovej aplikácie automatizovaného riadenia technológie hydroabrazívneho delenia technických materiálov*. 1. vyd. Prešov : FVT TU, 2008. 77 s. ISBN 978-80-553-0133-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015
Datum odevzdání: 16.05.2016





doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....16. 5. 2016

.....Karel

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucí diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16.5.2016

Karel

podpis

Jméno a příjmení autora práce: PAVEL VACEK

Adresa trvalého pobytu autora práce: CHARVÁTŮ, DRAHLŮV 267

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VACEK, P. *Analýza topografie povrchů vytvořených hydroabrazivní dezintegrací rotujících obrobků*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 50 s. Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, PhD.

Diplomová práce se zabývá analýzou topografie povrchu soustružených součástí abrazivním vodním paprskem. V úvodu je popsán druh paprsku a vytváření paprsku. Dále je vysvětlen princip různých režimů soustružení a popsán mechanismus úběru a činitelé v procesu. V další části je proveden rozbor prací týkajících se úběru materiálu a topografie povrchu. V experimentální části byl osoustružen obrobek z titanu grade 3 o průměru 46 mm kontinuálním abrazivním vodním paprskem tlakem 400 MPa. Během procesu byla měněna pouze hodnota posuvové rychlosti a byla zkoumána drsnost a izotropie povrchu. Bylo možné vypořádat měnící se tendenci drsnosti, ale vývoj této tendence zjištěn nebyl. Hodnoty izotropie se s vyššími hodnotami posuvu převážně snižovaly a nejlepšího povrchu bylo dosaženo při nejvyšší rychlosti posuvu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VACEK, P. *Surface Topography Analysis Created by Hydroabrasive Disintegration of Rotating Workpieces*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2016, 50 p. Thesis head: : doc. Ing. et. Ing. Mgr. Jana Petřů, PhD.

This thesis deals with analysis of surface topography turned parts by abrasive water jet. In introduction describing type of water jet a creation of jet. Next there is an explanation of different modes of turning and describe of removal mechanism and influencing factors. In next part was studied material removal and surface topography. In experiment has been turned workpiece with diameter 46 mm with continuous abrasive water jet by pressure 400 MPa. In process has been changed only value of traverse speed and analyzed surface roughness and isotropy of surface. It can be observe different tendency of roughness but

tendency was not analyzed. Values of isotropy was better with higher values of traverse speed and best surface was reached by higher value of traverse speed too.

Seznam použitých značek a symbolů

AWJ - Abrasive water jet - abrazivní vodní paprsek

D - průměr obrobku (mm)

N - otáčky za minutu (min^{-1})

P - tlak vody (MPa)

Ra - průměrná výška profilu drsnosti (μm)

Rq - průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti (μm)

Rz - největší výška profilu drsnosti (μm)

Sa - aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu (μm)

Sq - základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu (μm)

Sz - maximální výška omezené stupnice povrchu (μm)

d_f – průměr zaostřující trubice (mm)

d_j - průměr paprsku (mm)

d_o - průměr hrdla trysky (mm)

m - hmotnost abrazivní částice (g)

m_a - průtok abraziva ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

v_f - rychlost posuvu ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)

x - radiální pozice paprsku (mm)

z - velikost zdvihu, offset (mm)

α - místní dopadový úhel paprsku ($^\circ$)

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	6
0 Úvod.....	8
1 Analýza současného stavu problematiky	10
1.1 Historie vodního paprsku.....	10
1.2 Rozdělení vodních paprsků.....	10
1.3 Princip systémů vytváření abrazivního vodního paprsku.	11
1.3.1 Princip vytváření vysokotlakého proudu vody pomocí multiplikátoru	11
1.3.2 Multiplikátor	12
1.3.3 Akumulátor	12
1.4 Řezná hlava.....	13
1.5 Režimy pro soustružení abrazivním vodním paprskem.....	13
1.5.1 Princip tangenciálního soustružení abrazivním vodním paprskem	14
1.5.2 Princip radiálního soustružení abrazivním vodním paprskem.....	16
1.6 Nejdůležitější činitelé v procesu AWJ soustružení.....	17
1.7 Mechanismus úběru pro soustružení abrazivním vodním paprskem.....	18
1.7.1 Rozbor prací týkajících se úběru materiálu	19
1.7.2 Zhodnocení	20
1.8 Rozbor současných prací týkajících se topografie povrchu.....	21
1.8.1 Závěrečné zhodnocení vyhodnocených prací	35
2 Definování nedostatků a návrh řešení problému.....	38
3 Experimentální metodika a experimentální ověřování	39
3.1 Vlastnosti a obrobitelnost titanu	39
3.2 Materiál a metodika soustružení	40
4 Diskuse a konfrontace výsledků se stávající literaturou	43
4.1 Měření topografie povrchu	43
4.2 Diskuze nad výsledky a srovnání s jinými pracemi.....	51
5 Nový přístup k řešeným problémům.....	54
6 Závěr	55
7 Seznam použité literatury	57
8 Seznam obrázků	61
9 Seznam tabulek	62

0 Úvod

V současné době je snaha o obrábění všech druhů materiálů. Množství materiálů je obrovské a vědci vyvíjí další pro dosažení potřebných vlastností. Vlastnosti materiálu jsou mnohdy specifické a není možné obrábět je konvenčními způsoby obrábění. Mezi speciální vlastnosti se může řadit velká křehkost, vysoká tepelná vodivost, pružnost. Některé materiály jsou příliš měkké pro obrábění, některé příliš tvrdé nebo houževnaté. Obecně lze říci, že jde o speciální vlastnosti materiálu. Tato snaha se odráží ve vyvíjení nových technologií pro obrábění zdokonalených a přizpůsobených materiálů. Tyto nové technologie se nazývají nekonvenční metody. Nekonvenční metody se snaží nahradit nebo podpořit konvenční způsoby obrábění. Mezi jednu z nekonvenčních metod patří obrábění vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem. Tato technologie využívá vysokého tlaku vody, který je proměněn na vysokorychlostní paprsek, do kterého jsou přidávány abrazivní částice. Možnosti využití abrazivního vodního paprsku jsou široké. Nejvíce používané a vyvíjené je dělení, ale novější aplikace zmíněné metody dovolují i hloubení děr, frézování, tvorbu závitů a soustružení. Dále může tato metoda asistovat běžnému soustružení jako nástroj pro vyšší životnost nože. Tato práce je zaměřená na již zmíněnou metodu soustružení abrazivním vodním paprskem. Zejména pak na vyšetření topografie povrchu touto metodou, která se vyznačuje nízkými řeznými silami. Způsobuje minimální anebo v ideálním případě žádné tepelné ovlivnění materiálu. Zejména je tento atribut velmi výhodný pro obrábění materiálů se specifickými vlastnostmi, jako jsou titan, keramika, papír, guma, sklo, hliník. Lze ji však použít i v obrábění všech druhů materiálů. Další z výhod je velká efektivita a ekonomičnost procesu, navíc je tato metoda šetrná vůči prostředí. Mezi nevýhody této techniky patří nízká přesnost vyrobených tvarů.

Cíl diplomové práce je analýza topografie povrchu materiálu vytvořeného tangenciálním souběžným soustružením vysokorychlostním abrazivním paprskem. Pro daný cíl je potřeba studovat výslednou topografii materiálu při změně určitých podmínek procesu. Toto ovlivnění procesu tvoření povrchu při měnících se podmínkách bude nápomocné pro optimalizaci procesu soustružení. Po optimalizaci bude možné obrábět materiály ekonomičtěji a s lepšími dosahovanými parametry drsnosti. Pro studium topografie povrchu bude nutné vyšetřit aktuální stav problematiky, a poté ji i zhodnotit. Dále se provede měření a vyhodnocení topografie povrchu vytvořeného soustružením abrazivním vodním paprskem. Poslední část bude obsahovat diskuzi nad výsledky experimentu, řešení problematiky povrchu a směr dalšího výzkumu.

Experimentální část se týkala tangenciálního souběžného soustružení abrazivním vodním paprskem titanu grade 3. Pro experiment byl použit titanový obrobek o průměru 46 mm. Experiment byl zhotoven použitím kontinuálního abrazivního vodního paprsku s tlakem 400 MPa. Postupně se měnila hodnota posuvové rychlosti $v_f = 1,5; 3; 4,5; 6; 7,5 \text{ mm.min}^{-1}$ za stejných technologických podmínek. Abrazivní částice byly dávkovány do vodního paprsku množstvím $0,4 \text{ kg.min}^{-1}$ při otáčkách obrobku 34 min^{-1} .

Táto práca je podporovaná slovenskou agentúrou pro výzkum a vývoj na základě smlouvy č. APVV-207-12. Experimenty byly placeny z tohoto projektu.

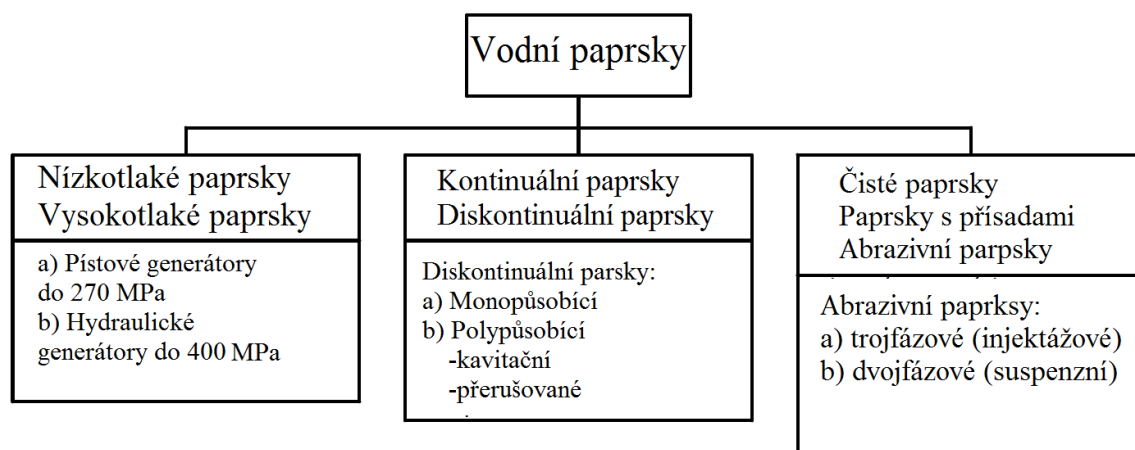
1 Analýza současného stavu problematiky

1.1 Historie vodního paprsku

Historie vodního paprsku sahá ve skutečnosti do 19. století, kdy kalifornští zlatokopové okolo roku 1870 využívali metodu vodního paprsku k odstraňování nánosů bahna, písku a kamení. Rok 1920 je označován za začátek používání vodních trysek pro odstranění písku a hornin během stavebních činností. Tyto trysky dosahovaly velké rychlosti toku s tlaky několika desítek až stovek barů. První patent byl pořízen v Rusku pro vrtání děr v báňském průmyslu. Další rozvoj podpořil Petr Tupitsyn z Ukrajiny. V roce 1936 použil vodní paprsek pro řezání děr uhelných slojí. Díky tlumení záření se mezi lety 1950 až 1960 zkoumala tato metoda podrobněji. Dr. Norman Franz byl první, kdo studoval použití vysokého tlaku vody jako řezného nástroje. Proto je tato osobnost považována za stvořitele vodního paprsku. Komerční aplikace se objevila až v roce 1971. Potřebě těžit uran se musel vodní paprsek dále vyvíjet. Přestože rozvoj řezání vodním paprskem započal v polovině 20. století, nastal větší vývoj až v osmdesátých letech, kdy se do vodního paprsku začalo přidávat abrazivo. V padesátých letech dvacátého století experimentoval Dr. Norman Franz s řezáním vodním paprskem. Tato technologie se dále vyvíjela díky Dr. Mohamedu Hashishovi, který začal přidávat již zmíněné abrazivo, a tím bylo možné využít vodního paprsku i pro řezání materiálů s vyšší pevností a tloušťkou [1].

1.2 Rozdělení vodních paprsků

Vodní paprsky se rozdělují podle různých hledisek. Jedno z rozdělení je zobrazeno na Obr. 1. Rozdělení z pohledu tlaku na vysokotlaké paprsky, nízkotlaké paprsky, z pohledu kontinuity paprsku na kontinuální a diskontinuální a z pohledu přísad obsažených v paprsku [10].



Obr. 1 Rozdělení vodního paprsku [9]

Další rozdělení vodních paprsků je zobrazeno na Obr. 2. Rozdělení je z hlediska druhu kapaliny použité v paprsku, velikosti tlaku, druhu příměsi, typ proudění paprsku a druhu dodávání abraziva [21]. Zvýrazněné kolonky vyznačují druh kapalinového paprsku použitého v experimentální části.



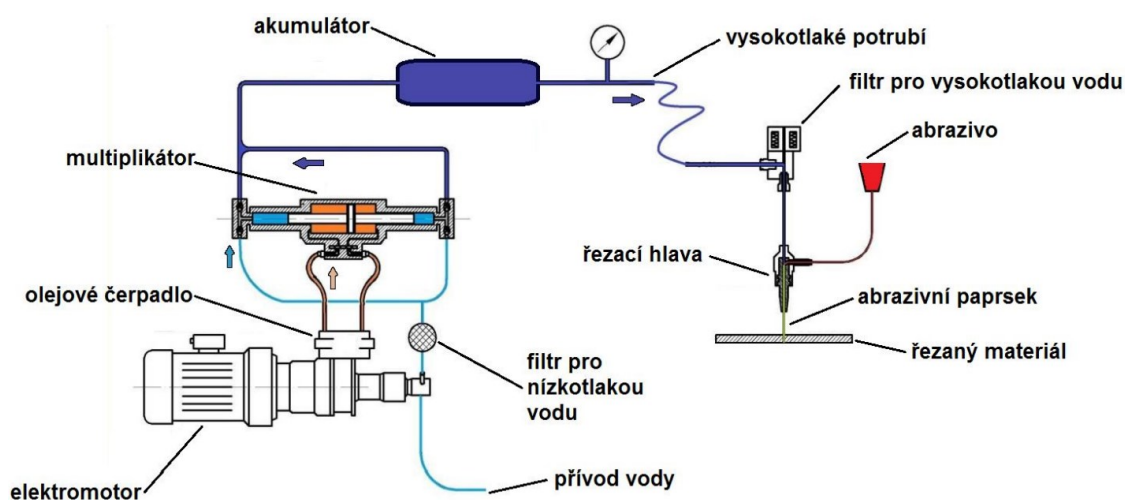
Obr. 2 Širší rozdělení vodního paprsku [21]

1.3 Princip systémů vytváření abrazivního vodního paprsku.

1.3.1 Princip vytváření vysokotlakého proudu vody pomocí multiplikátoru

Hlavním vykonavatelem práce při vytváření abrazivního vodního paprsku je zařízení s multiplikátorem. Do tohoto zařízení je hydraulickým čerpadlem, pohaněným elektromotorem, přiváděna hydraulická kapalina. Dále je do multiplikátoru přiváděna také filtrovaná voda, neboli permeát. Multiplikátor znásobí tlak čerpadla a vyvine potřebný tlak

vody okolo 400 MPa. Dále je kapalina vedena vysokotlakým potrubím do akumulátoru, což je vysokotlaká nádoba pro tlumení rázu kapaliny. Na potrubí jsou umístěny uzavírací ventily pro regulaci průtoku kapaliny. Natlakovaná voda se dostane až do řezací hlavy, kde je přeměněna na vysokorychlostní paprsek. V řezné hlavě se mísí voda s abrazivem [12]. Schéma abrazivního vodního paprsku lze vidět na Obr. 3.



Obr. 3 Schéma tvorby abrazivního vodního paprsku [12]

Pro nižší tlaky je možné použít také plunžrové triplexové čerpadlo, to se používá pro tlaky do 300 MPa, je však méně spolehlivé pro vysoké tlaky [12]

1.3.2 Multiplikátor

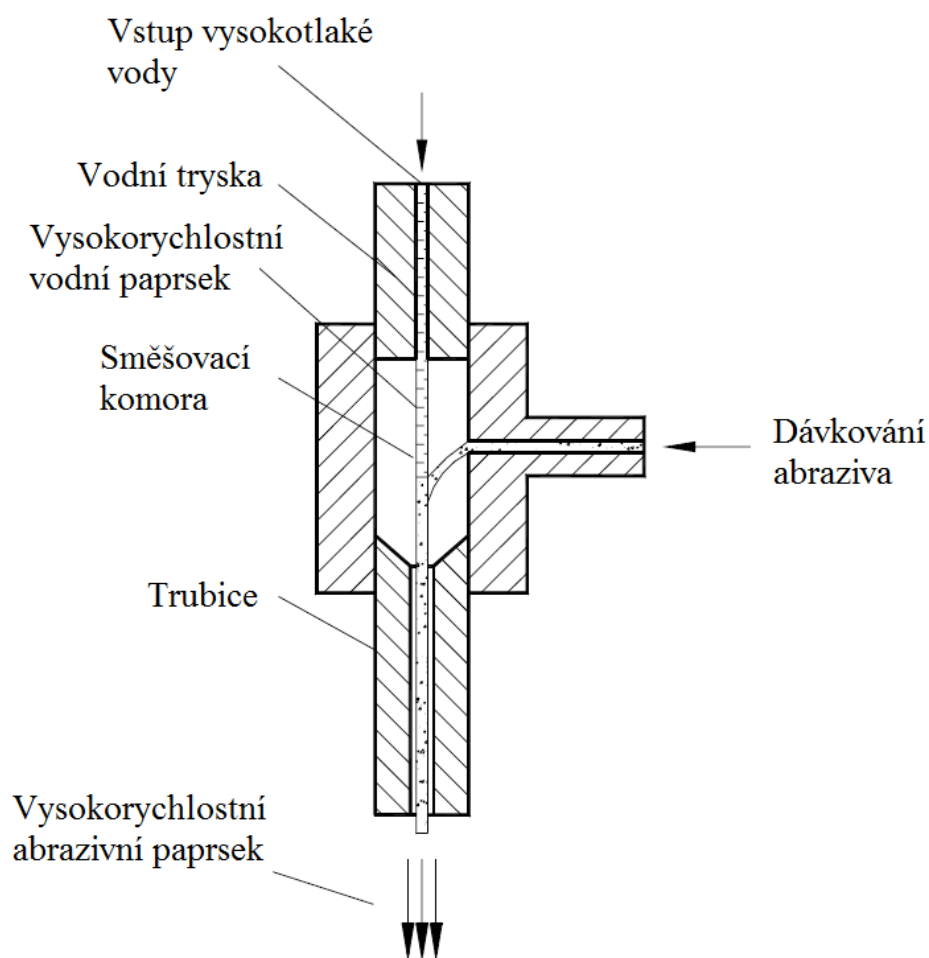
Pro tento experiment bylo použito zařízení s dvěma multiplikátory. Multiplikátor se skládá ze dvou různých průměrů. Píst většího průměru je poháněn nízkotlakým hydraulickým okruhem tlakem od 5 do 35 MPa. Tlak v druhém válci je vyšší, způsobuje to rozdílný průměr válců. Poměr tlaku závisí na poměru průměrů pístů. Tyto poměry jsou od 1:10 do 1:25. Při zvětšení poměru se může tlak zvýšit na hodnotu tlaku až 400 MPa. V dvojčinných násobičích jedna jednotka dodává vysokotlakou vodu a druhá ji znovu naplňuje permeátem, filtrátem [10].

1.3.3 Akumulátor

Multiplikátor způsobuje kolísání tlaku. Pro toto kolísání tlaku je nutné použít akumulátor. Akumulátor slouží pro tlumení rázu kapaliny vyvolané pulzací paprsku po stlačení kapaliny. Pro správnou funkci musí být zvolen vhodný akumulátor pro dané čerpadlo nebo multiplikátor [12].

1.4 Řezná hlava

Po opuštění akumulátoru se natlakovaná voda dostává vysokotlakými trubicemi do řezné hlavy. V této části (Obr. 4) se přeměňuje vysokotlaký permeát na vysokorychlostní paprsek, který slouží jako nástroj při soustružení a také slouží jako unášec abrazivních částic. Je to konečný prvek, který realizuje proces abrazivního vodního paprsku. Přivádí se do ní vysokotlaký permeát a abrazivní částice pro vytvoření nástroje, pomocí kterého se vykonává proces soustružení. Konstrukce a nastavení vnitřních částí je důležité pro efektivitu procesu soustružení, proto se hlavice neustále vyvíjí a zkoumá [10].



Obr. 4 Schéma řezné hlavy, princip přeměny vysokotlakého paprsku na vysokorychlostní [10]

1.5 Režimy pro soustružení abrazivním vodním paprskem

Soustružení AWJ má dva režimy polohy paprsku. Při jednom režimu dopadá paprsek přímo na osu obrobku. Tento systém se nazývá radiální. Při druhém je paprsek odsazen

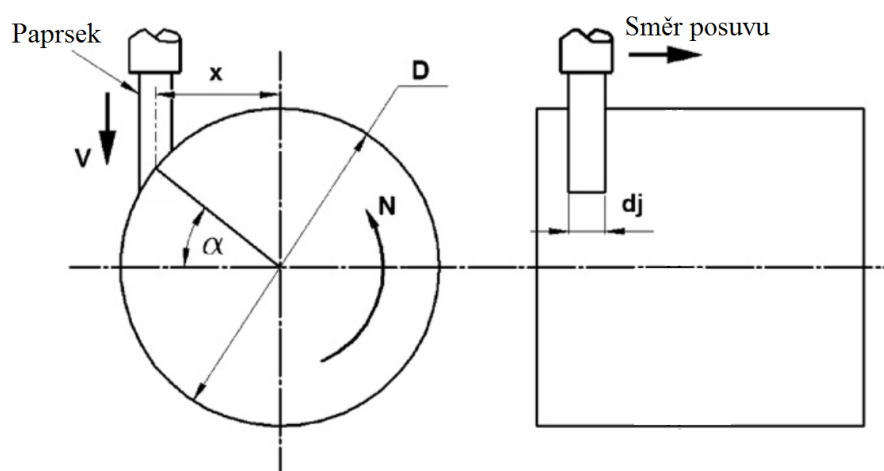
od osy o určitou vzdálenost a tento proces označujeme jako offsetový režim, neboli tangenciální soustružení.

1.5.1 Princip tangenciálního soustružení abrazivním vodním paprskem

Soustružení abrazivním paprskem se dělí na dva režimy popsané výše. Tyto režimy se vzájemně velmi liší a i forma úběru je jiná. Zatímco při radiálním soustružení je řezná hlava nasměrována na vertikální osu obrobku, nebo mírně vychýlená o určitý úhel, u tangenciálního soustružení AWJ je paprsek nasměrován na obrobek určitým úhlem dopadu. Úhel dopadu α se dá definovat jako

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{2x}{D} \quad (1)$$

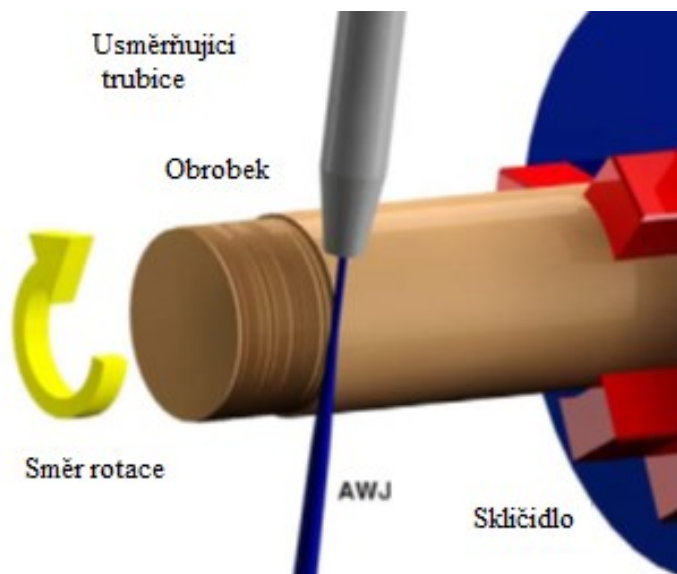
Rovnice úhlu dopadu se vztahuje na vzdálenost osy paprsku od vertikální osy obrobku, to je radiální vzdálenost x s průměrem obrobku D . Průměr paprsku je označen jako d_j . Otáčky obrobku jsou označeny jako N . Průměr obrobku D a rychlost paprsku V [14]. Schéma souběžného soustružení abrazivním vodním paprskem Obr. 5.



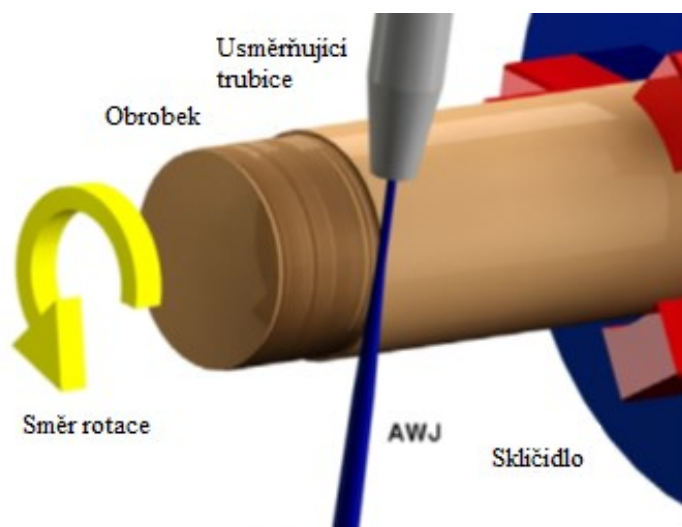
Obr. 5 Dopadový úhel pro tangenciální režim souběžného soustružení abrazivním vodním paprskem [14]

Obrobek je upnutý v čelistích sklíčidla a rotuje konstantními otáčkami. Do řezné hlavy je vysokotlakou trubicí přiváděn vysokotlaký permeát. Tato vysoce natlakovaná přefiltrovaná energie vody je v řezné hlavě přeměněna na vysokorychlostní paprsek, do kterého se přidává abrazivo. Tangenciální soustružení abrazivním vodním paprskem se dále dělí podle směru rotace obrobku na souběžné a protiběžné. Při souběžném režimu AWJ soustružení se obrobek točí ve směru působení paprsku. Při protiběžném soustružení

se obrobek točí proti působení tohoto paprsku [7]. Souběžné tangenciální soustružení lze vidět na Obr. 6 a konvenční protiběžné soustružení na Obr. 7.



Obr. 6 Souběžné tangenciální soustružení [7]



Obr. 7 Konvenční protiběžné soustružení [7]

Translační pohyb vodního paprsku, který je paralelní s osou obrobku, se pohybuje stejně jako nástroj u konvenčního soustružení [14]. Tryska je od obrobku vzdálena o určitou vzdálenost. Této distanci se říká zdvih.

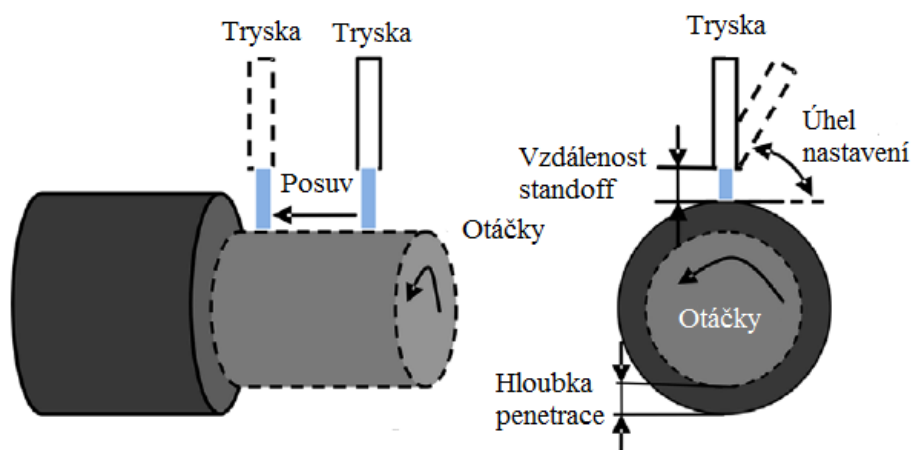
Ve většině případu se používá soustružení souběžné a bylo použito i v našem experimentu. Jak již bylo zmíněno výše, obrobek rotuje ve směru vodního paprsku. Souběžným soustružením je dosaženo lepšího povrchu a lepší kruhovitosti, což lze vypožorovat z práce [17]. Vyšší kvalita obrobku může být zapříčiněna lepším odvodem třísek, což má za následek menší odražení paprsku od obrobku a lepší dosahovaný povrch.

Lepší odvod třísek má také za následek větší efektivitu paprsku a tím pádem výraznější efekt vysokorychlostních abrazivních částic unášejících třísky. Pro soustružení abrazivním vodním paprskem se jeví tangenciální abrazivní souběžné soustružení jako nejlepší. To lze usuzovat na základě kvalitnějšího dosaženého povrchu a nejlepší kruhovitosti.

Mezi nevýhody této metody patří nízký úběr materiálu v porovnání s radiálním soustružením. Nízký úběr nastává díky velké vzdálenosti zdvihu. Při velké vzdálenosti trysky od obrobku dochází k poklesu rychlosti a tím i energie abrazivního vodního paprsku, který nemá potřebnou energii pro dostatečně velký úběr. Další nevýhodou je stále nedostačující drsnost povrchu pro strojní součásti. Tato metoda se dá použít pouze jako přípravná operace pro další konvenční soustružení.

1.5.2 Princip radiálního soustružení abrazivním vodním paprskem.

Princip radiálního soustružení spočívá v nasměrování abrazivního vodního paprsku na horizontální osu obrobku nebo mírně vychýleně. Abrazivní částice dopadají normálově nebo mírně vychýleně od normály na povrch a tím je možnost dosáhnout maximálního úběru materiálu [13]. Obrobek je upnut do čelistí sklíčidla a posuv je realizován stejně jako u konvenčního soustružení. Tryska je od obrobku vzdálena o určitý zdvih. Postup dodání vody do řezné hlavice je stejný jako u tangenciálního soustružení. Schéma radiálního soustružení lze vidět na Obr. 8.



Obr. 8 Radiální soustružení [13]

Radiální režim soustružení se v současné době příliš nepoužívá. Důvod nižší aplikace radiálního režimu souvisí se špatnou predikcí finálního průměru. To může být odůvodněno působením paprsku přímo na osu obrobku. Díky tomuto působení se musí nastavit provozní parametry na optimální úroveň pro každý průměr zvlášť. Z toho důvodu musí být provedena

důkladná optimalizace provozních podmínek, což je časově méně efektivní. Navíc každý materiál vykazuje jiný úběr, takže se musí optimalizovat provozní podmínky i pro jiný materiál.

Mezi výhody radiálního režimu soustružení abrazivním vodním paprskem patří vysoký úběr materiálu, díky menším přípustným hodnotám zdvihu [13].

Mezi nevýhody radiálního režimu patří nedostatečná drsnost povrchu, která dokonce vykazuje vyšší hodnoty drsnosti povrchu než tangenciální souběžné soustružení AWJ. Další nevýhodou je vysoká náročnost predikce finálního průměru.

1.6 Nejdůležitější činitelé v procesu AWJ soustružení

Činitelé jsou různé, nejdůležitější jsou provozní a materiálové parametry abraziva. Provozní parametry lze definovat jako nastavení procesu soustružení. Při různých hodnotách parametrů dosáhneme rozdílných výsledků. Každý z faktorů má odlišný vliv na řezný proces a jejich volba závisí na kvalitě a efektivitě výsledné součásti. Některé parametry se během soustružení mění díky vnějším vlivům. Mezi proměnlivou proměnnou se dá řadit hloubka řezu a dopadový úhel. Mezi nejdůležitější provozní parametry patří posuvová rychlost, abrazivní průtok, tlak, otáčky, hloubka řezu a hodnota zdvihu. Posuv je realizován stejně jako u konvenčního soustružení paralelně s osou obrobku. Abrazivní průtok, ovlivňuje hodnotu abrazivních zrn ve vodním paprsku. Tlak vody, ovlivňuje sílu paprsku. Hloubka řezu se nastavuje hodnotou radiální vzdálenosti. Hodnota zdvihu je rovna vzdálenosti ústí od obrobku. Její hodnota ovlivňuje sílu paprsku, který ztrácí při větších vzdálenostech sílu. Průměr vodní trysky ovlivňuje změnu tlakové vody na vysokorychlostní a díky tomu se a pokračuje do zaostřovací trubice, kde se zmenšuje až na konečný průměr paprsku.

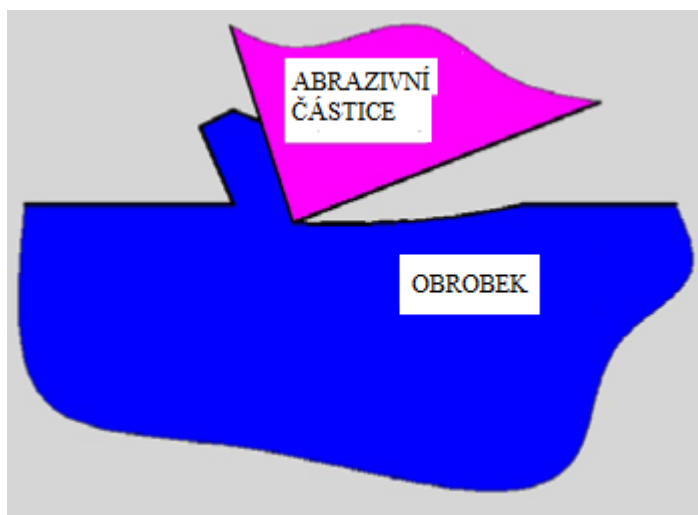
Mezi dalšími činiteli je druh materiálu, homogenita, tvrdost, houževnatost, druh, tvrdost a tvar abraziva [6], [9], [10].

Vlivy těchto činitelů na topografii povrchu jsou popsány níže.

1.7 Mechanismus úběru pro soustružení abrazivním vodním paprskem

Obrábění rotujících obrobků patří mezi důležité strojní operace, kde se jako možná technika zpracování používá soustružení vysokorychlostním abrazivním paprskem. Tato metoda umožňuje obrábět všechny druhy materiálu. Jak už bylo zmíněno v rozdělení vodních paprsků, abrazivní vodní paprsek je kontinuální vysokotlaký proud vody. Tlak vody se pohybuje okolo 400 MPa a je generován hydraulickými čerpadly s pomocnými násobiči tlaku neboli multiplikátory. Vysokotlaký proud se mění v řezné hlavě pomocí vodní trysky na vysokorychlostní paprsek, ten dále vychází z řezné hlavice o rychlosti 500 až 700 m.s⁻¹. Rychlost je ovlivněna přidáváním abraziva do paprsku. Tento proces zpomaluje paprsek zhruba o 200 až 400 m.s⁻¹. Výhoda AWJ je její univerzálnost a to, že se při obrábění nemusí měnit nástroje a tím se snižují přípravné časy [10]. Ali a Wang [2] zjistili, že není jiný obráběcí proces, kde by bylo možné obrábět válce bez změny nástroje a tím pádem i obrábět bez vypnutí stroje [2]. Odběr materiálu probíhá bez tepelně ovlivněné oblasti a s vysokou přesností mikro-obrábění. To představuje vhodnou metodu pro řezání a obrábění materiálů, kde používání konvenčních metod může být problematické [8].

Obrábění se realizuje formou abrazivních částic rozptýlených ve vysokorychlostním vodním paprsku, které dopadají na povrch obrobku v pracovním místě. Zde dochází k tvorbě trhlin neboli mikrotřísek, ořezávání a omílání obrobku pomocí částic, přičemž se odplavuje tříska. V obrobku vznikají deformace a následně nastává tvrzení materiálu [15], [18]. Kontakt abrazivní částice s obrobkem Obr. 9.



Obr. 9 Kontakt abrazivní částice s obrobkem [6]

Tato metoda, když jsou dodrženy nízké tolerance, také dovoluje obrábět polotovary o velké délce a malém průměru [22].

Významnými výhodami této technologie jsou: relativně malá řezná síla (síla je pod 40 N) a studený odběr materiálu (bez tepelně ovlivnění oblasti). To umožňuje obrábění speciálních materiálů (slitiny citlivé na teplo a kompozity), kde nelze použít konvenční metody [4].

Byla provedena vizualizační studie k pochopení makromechaniky AWJ obráběcího procesu. V tomto výzkumu bylo uvedeno, že úběr materiálu probíhá spíše na čele obrobku, než na obvodě [14]. Andari a Hashish [3] provedli experimentální studii k prostudování vlivu různých parametrů AWJ na odstraňovaných objemech materiálu. Výsledky ukázaly, že velikost materiálu odebíraného při AWJ soustružení a AWJ řezání je podobné [3]. Studium přesnosti soustružení s AWJ odhalilo, že přesnost soustružených dílů je ovlivněna odchylkou a odrazem paprsku. Nestabilita paprsku způsobuje hrubší povrch, rýhování, špatnou kruhovitost a nekonzistenci dosaženého průměru [24]. Největší efekt na konečný výsledek mají provozní parametry.

1.7.1 Rozbor prací týkajících se úběru materiálu

Byl vytvořen erozivní model pro souběžné soustružení abrazivním vodním paprskem pro houževnaté materiály, konkrétně pro hliníkovou slitinu. Tento model je sestaven pro predikci finálního průměru při změnách posuvové rychlosti a pro různé úhly dopadu. Snaží se o odhad úběru materiálu abrazivními částicemi [14].

Z novějších prací se optimalizací velikostí úběru tangenciálním souběžným AWJ soustružením zabývala práce [23]. Zde se využívají metody kombinovaného otočného experimentálního plánu (CCRD), do kterého jsou vloženy provozní parametry: vodní tlak, abrazivní průtok, posuvová rychlost, hloubka řezu a otáčky obrobku. Tento experimentální plán je pak vyšetřen analýzou rozptylu (ANOVA). Tato metoda dokáže porovnávat efekty dvou parametrů při zachování ostatních konstantních parametrů [23].

Bylo zjištěno, že všechny hodnoty, kromě otáček obrobku, byly pro ovlivnění hodnoty úběru významné. Studie prokázala, že nejenom přímý efekt hlavních parametrů, kromě otáček, ovlivňuje obráběcí proces, ale i vzájemné efekty mezi nimi. Mezi nejvíce ovlivňujícími interakčními parametry jsou posuvová rychlost s tlakem, tlak s hloubkou řezu, abrazivní průtok s posuvovou rychlostí a posuvová rychlost s hloubkou řezu. Analýza ukázala, že nejvíce ovlivňujícími parametry jsou hloubka řezu a posuvová rychlost. Při jejich zvyšování se s kombinací s většinou ostatních parametrů hloubka úběru zvýší. Zároveň tlak měl na tyto dva parametry velký vliv, takže při zvyšování tlaku se úběr materiálu také zvýšil.

1.7.2 Zhodnocení

V současné době chybí studie trajektorie abrazivních částic u tangenciálního soustružení a náhled „dovnitř“ mechaniky procesu. Nejsou vymodelovány trajektorie odražení paprsků od různých druhů materiálů, tudíž není možné vytvořit matematický model pro proměnlivé dosažené hodnoty průměrů. Chybí podrobnější analýza interakce abrazivních částic od rotujících obrobků a interakce třísek s abrazivním vodním paprskem. Predikční modely zahrnují do výpočtů empirické konstanty, které zkreslují finální výpočet. Přesto, že mají dobrou predikční schopnost, liší se jejich hodnoty o milimetry, což pro přesné soustružení nevhodné. V modelu pro predikci průměru se nepočítá s rozptylem a vychýlením paprsku. Dále uvažuje, že mechanismy řezání a soustružení abrazivním vodním paprskem jsou podobné. Toto tvrzení udává další odchylky ve výpočtu.

Erozivní model počítá s ideálním úhlem dopadu částic, který se ale během soustružení mění. Z toho důvodu je možné usuzovat, že pro další výzkum je potřeba prozkoumat mechanismus úběru materiálu, skutečný úhel dopadu částic, na rozdíl od ideálního dopadového úhlu a způsob, jakým se paprsek a abrazivní částice vychylují od materiálu. Tento model dokáže predikovat relativně přesně průměry při měnících se hodnotách dopadových úhlu a posuvu, takže položil základ pro další inovaci.

Model, zabývající se optimalizací procesu z hlediska většího úběru materiálu, zdůraznil parametry vhodné pro vyšší efektivitu. Bohužel s větší efektivitou procesu se může zvyšovat drsnost povrchu a vyšší hodnoty úběru budou zbytečné. Nicméně, tato práce předložila metody vhodné pro optimalizaci provozních parametrů a budou se podle ní moci optimalizovat i parametry ovlivňující drsnost povrchu a geometrickou přesnost. Navíc touto metodou lze optimalizovat parametry při nízkém počtu experimentů.

1.8 Rozbor současných prací týkajících se topografie povrchu

Konvenční soustružení patří mezi velmi rozšířený výrobní proces. Úplné nahrazení konvenčního soustružení při daných hodnotách dosahovaných drsností a kruhovitostí nelze zrealizovat a tak roste snaha o optimalizaci tohoto procesu. Metodikou soustružení abrazivním vodním paprskem se zabývalo mnoho autorů.

Mezi jednu z prací, zabývajících se problematikou soustružení abrazivním vodním paprskem, patří [15]. Publikace se zabývala problematikou vlivu posuvové rychlosti na makro a mikro strukturu obrobku a na topografii osoustruženého povrchu souběžným tangenciálním soustružením AWJ obrobku ze slitiny titanu. Tato práce poskytla zjištění, že při zvyšování hodnot posuvové rychlosti, se zvětšuje průměr obrobku díky nedostatečné energii paprsku [15]. Hodnota drsností se ale měnila nerovnoměrně v rámci posuvové rychlosti, jak lze vidět v Tabulka 1.

Tabulka 1 Hodnota dosažených drsností povrchu a průměrů pro titanovou slitinu [15]

v_f [mm.min ⁻¹]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]	$\varnothing D$ [mm]
1,5	6,2	7,9	43,5	41,2
3	5,1	6,3	33,5	41,7
4,5	10,6	12,6	58,2	42,4
6	7,6	9,2	45,7	42,8
7,5	7,9	10,3	52,1	43,1

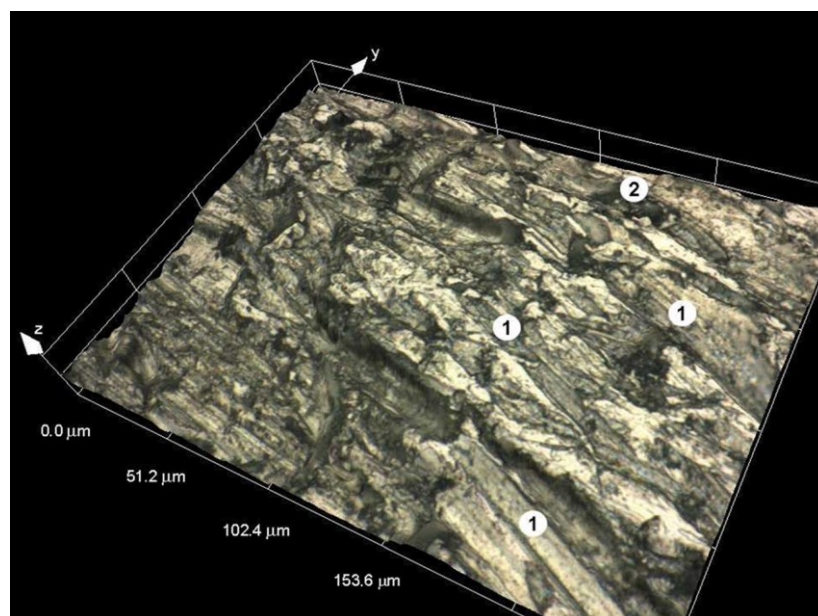
Bohužel tato práce neuvedla důvod kolísání hodnot drsnosti povrchu. Jak lze vidět, nejmenší hodnoty drsnosti povrchu bylo dosaženo při hodnotě posuvu 3 mm.min⁻¹. Z toho lze usuzovat, že je potřeba vyhledat optimální hodnoty posuvu pro nejlepší drsnost povrchu. V dalším výzkumu je potřeba najít způsob, jak tuto optimální hodnotu zjistit.

Další z prací týkajících se měnící hodnoty posuvu je [5]. Tato publikace se také zabývá souběžným soustružením AWJ inconelu 925. Studuje velikost drsnosti povrchu v závislosti na zrychlování posuvové rychlosti. Výsledky ukázaly, že při zvyšování posuvové rychlosti se zvyšuje i drsnost povrchu a samozřejmě i průměr, jak bylo uvedeno výše. Hodnota drsnosti se příliš nezvyšuje. Hodnoty experimentu jsou uvedeny v Tabulka 2.

Tabulka 2 Hodnota dosažených drsností a průměrů pro inconel 925

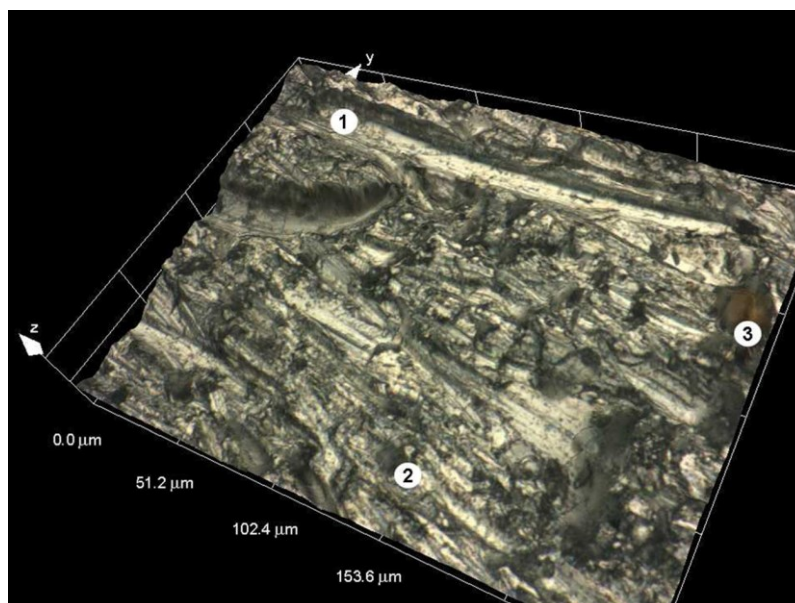
v_f [mm.min ⁻¹]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rz [μm]
1,5	3,06	5,1	29
3	3,59	8,4	41,4
4,5	3,98	10	47,7
6	4,11	10,6	49
7,5	5,06	11,4	55
9	5,12	11,7	60

Bylo zjištěno, že stopy po abrazivních částicích jsou navzájem paralelní a mají téměř stejnou délku. Jsou směřovány ve směru působení paprsku. Na konci stopy je vytvořená rýha, která ji jakoby prodlužuje. Tato stopa kopíruje dráhu paprsku a vytváří žlab, takže ji obklopuje převýšení povrchu, které není o moc vyšší než ostatní topografie povrchu. Na povrchu byly nalezeny oválné prohlubně náhodně, nebo umístěné ve směru stop [5]. Drsnost povrchu při nejnižší hodnotě posuvu Obr. 10.



Obr. 10 Drsnost povrchu při hodnotě rychlosti posuvu $v_f = 1,5 \text{ mm.min}^{-1}$. 1 Řezné stopy zanechané abrazivními zrnny. 2 Nepravidelná ovální prohlubeň orientována ve směru řezné stopy [5]

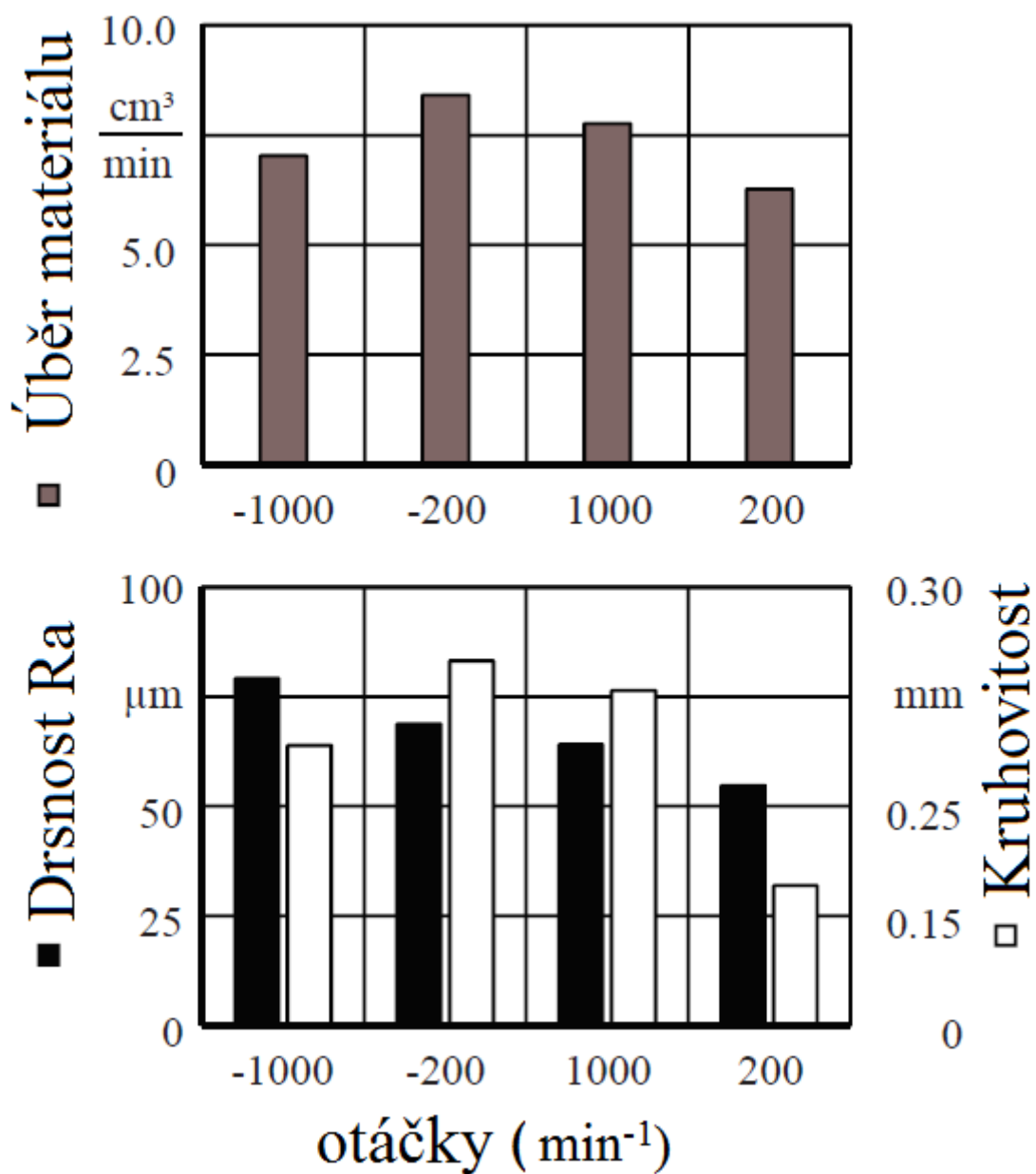
Při vyšší hodnotě posuvu se prodlužovaly stopy a měnily trajektorii, některé stopy se překrývají. Dále bylo v povrchu nalezeno zrno abraziva, což znamená, že je tvar a velikost abraziva důležitý pro finální povrch [5]. Drsnost povrchu při hodnotě rychlosti posuvu 9 mm.min^{-1} Obr. 11.



Obr. 11 Drsnost povrchu při hodnotě rychlosti posuvu $v_f = 9 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. 1 Dlouhá řezná stopa zanechaná abrazivními zrn. 2 Nepravidelná ovální prohlubeň orientována ve směru řezné stopy [5]

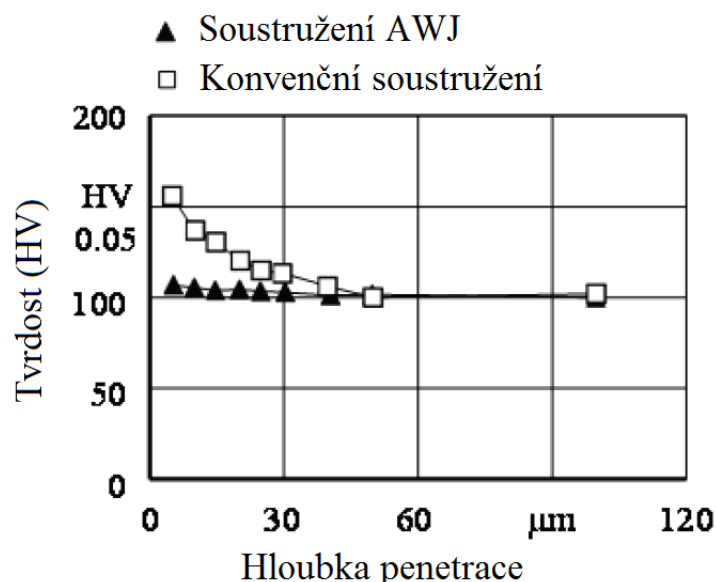
Zmíněná práce vyšetřila vliv posuvové rychlosti pro další materiál. Obrobek, na rozdíl od předchozí práce, vykazuje postupné zvyšování drsnosti povrchu. Toto zjištění nabízí spoustu zamyšlení. Je možné, že rychlost posuvu ovlivňuje drsnost povrchu u každého materiálu jiným způsobem pomocí jiného mechanismu úběru, nebo je prováděna nedostatečně efektivní a objektivní zkouška povrchu. Na povrchu byla zachycena abrazivní částice, což znamená další výzkum velikosti zrn na drsnost povrchu.

Další práce [17] se věnovala vyšetřování vlivem provozních parametrů na drsnost povrchu hliníkové slitiny. Publikace studovala vliv otáček, při souběžném a protiběžném soustružení abrazivním vodním paprskem, na úběr materiálu a drsnost povrchu. Dále srovnávala zpevnění povrchu abrazivními zrn oproti konvenčnímu soustružení. Autoři zjistili, že drsnost povrchu u souběžného režimu soustružení je lepší. Nejnižší hodnoty byly zjištěny při nižších otáčkách. Největšího úběru materiálu bylo dosaženo, při protiběžném režimu soustružení, při vyšších otáčkách. Nejnižší kruhovitosti bylo dosaženo při souběžném druhu soustružení [17]. Hodnoty úběru materiálu, drsnosti povrchu a kruhovitosti jsou uvedeny na Obr. 12.



Obr. 12 Graf hodnot drsnosti povrchu, úběru materiálu a kruhovitosti [17]

Zpevnění povrchu bylo mnohem menší než při konvenčním soustružení a dosahovalo menší hloubky. Navíc se ve slitině nacházely zrna křemíku, které byly méně zdeformované metodou AWJ [17]. Zpevnění lze vidět na Obr. 13.



Obr. 13 Zpevnění povrchu při AWJ soustružení v porovnání s konvenčním [17]

Následující práce zjistila výhody souběžného a protiběžného soustružení. Při souběžném soustružení je dosaženo lepší drsnosti povrchu. Při protiběžném soustružení je dosažena vyšší hodnota úběru materiálu, ale pouze při nízkých otáčkách. Můžeme sledovat vliv otáček při těchto dvou metodách. Při vyšších otáčkách protiběžného soustružení je nižší úběr materiálu, menší hodnota kruhovitosti a vyšší hodnota drsnosti. Naopak u soustružení souběžného je při vyšších otáčkách dosaženo vyšší hodnoty úběru a vyšší hodnoty kruhovitosti, ale stejně jako u protiběžného i vyšší drsnosti.

Je možné, že při souběžném soustružení paprsek ubírá třísku spíše ve vrchní části obrobku, tudíž při nižších otáčkách se paprsek vychýlí od nově přichozícího materiálu a stihne se vrátit do výchozí polohy. Zatímco při vyšších otáčkách se nestihne vrátit a tím pádem jsou vyšší hodnoty drsnosti a kruhovitosti. U protiběžného by se měla ubírat tříska při nižších otáčkách ve spodní části obrobku, tudíž zde nemá takovou kinetickou energii pro úběr a zvyšuje se kruhovitost za přítomnosti dobré drsnosti. Zatímco při vyšších otáčkách proti paprsku nestíhá paprsek ubírat třísku a probíhá tak například ve střední poloze obrobku. Z těchto důvodů je drsnost povrchu horší ale kruhovitost lepší.

Dále tato práce srovnávala zpevnění povrchu abrazivními zrny oproti konvenčnímu soustružení. Použité metody abrazivního vodního paprsku jsou z hlediska zpevnění výhodnější díky menší tepelně ovlivněné oblasti.

Práce [22] studovala vliv rozdílných průměrů zaostřovací trubice na drsnost povrchu hliníkové slitiny a grafitu. Při změně průměru zaostřovací trubice se změnil i abrazivní průtok, což také ovlivňovalo povrch. Na nejmenším průměru byla hloubka řezu 4 mm,

na středním 2,5 mm a na nejvyšším 1 mm. Ani na jednom z průměrů nebyla dosažena přesná hodnota. Při zvyšování hloubky řezu se drsnost zhoršovala u obou trysek. Tryska s menším průměrem obsahovala menší počet abrazivních částic na rozdíl od trysky s průměrem větším. Bylo zjištěno, že průměr zaostřovací trubice má vliv na dosažený povrch. U grafitového vzorku bylo toto působení neobjektivní, protože jeden ze tří měřených průměrů prasknul a dosažené průměry jsou díky jiné trajektorie rovněž odlišné. Hodnota drsnosti se s větším průměrem trubice u jednoho průměru nezvětšila a u druhého byla horší. Dosažená kruhovitost byla s větší tryskou lepší [22]. Hodnoty naměřených drsností pro grafit jsou v Tabulka 3.

Tabulka 3 Hodnota dosažených drsností povrchu a průměrů pro grafit [22]

Měřený průměr (mm)	Průměr zaostřující trubice $d_{f1}=0,5$ mm				Průměr zaostřující trubice $d_{f2}=0,78$ mm			
	Průměr vzorku (mm)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Průměr vzorku (mm)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
4	-	-	-	-	-	-	-	-
7	4,7	13	16	93	5,1	13	17	101
10	7,9	9	12	73	8,2	9,4	12	74

U hliníkového vzorku byly hodnoty drsnosti na menších průměrech s větší tryskou lepší a na největším průměru byly stejné. Zaostřující trubice s větším průměrem vykazovala lepší kruhovitost. Tento fakt byl vysvětlen menším počtem abrazivních částic v paprsku a tím pádem menší energií paprsku a větším odražením paprsku od neobrobeného povrchu. Menší energie také nastala díky větší pevnosti materiálu [22]. Hodnoty drsnosti jsou vidět v

Tabulka 4.

Tabulka 4 Hodnota dosažených drsností povrchu a průměrů pro hliníkovou slitinu [22]

Měřený průměr (mm)	Průměr zaostřující trubice $d_{f1}=0,5$ mm				Průměr zaostřující trubice $d_{f2}=0,78$ mm			
	Průměr vzorku (mm)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)	Průměr vzorku (mm)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
4	2,1	40	55	342	1,8	16	21	140
7	5,5	13	17	113	5,2	10	12	80
10	8,3	6	8	50	8,3	6	7	50

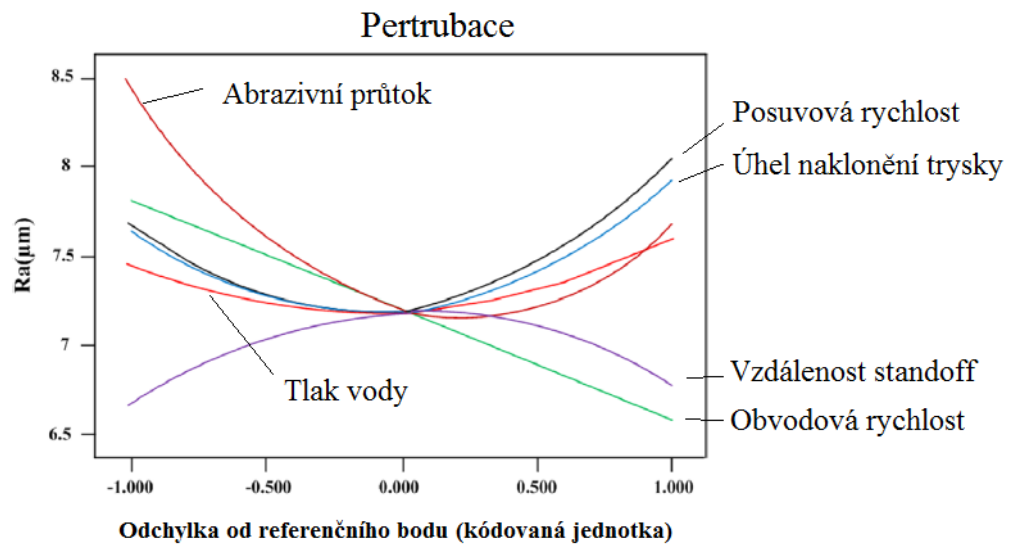
Tato studie narazila na problém s predikcí žádaného průměru. Zjistila, že větší průměr trysky zaručuje lepší kruhovitost, a to v závislosti na druhu materiálu. Drsnost povrchu byla ovlivněna velikostí trysek, ale je těžké říci jakým způsobem. Na menších průměrech vykazovala tryska lepší kruhovitost, v některých případech i drsnost. Výzkum naznačil, že s menším počtem abrazivních částic nemá paprsek takovou sílu a odráží se. Díky tomu můžeme usuzovat, že i když abrazivní částice zpomalují paprsek, výhodnější je, aby měl paprsek dostatečné množství abraziva. Dostatečné množství by mělo být předmětem dalšího výzkumu. Další výzkum by se měl zaměřit i na modely predikující průměr obrobku v závislosti na druhu materiálu a provozních podmínkách.

Vlivem provozních faktorů abrazivního vodního paprsku pro radiální soustružení se zabývala práce [13]. Publikace se zabývala modelováním a optimalizací provozních parametrů pro soustružení AWJ keramiky z oxidu hlinitého (aluminy) za použití responzní plochy v kombinaci s Box-behnkenovým návrhem. Využitím experimentů, byl vytvořen krychlový regresivní model pro predikci hloubky penetrace a drsnosti povrchu Ra použitím metody odezvy povrchu. Nejnížší dosažená hodnota drsnosti byla dosažena $5,3 \mu\text{m}$. Pro každou provozní podmínku byly určeny tři faktory a těm byly přiděleny tři hodnoty. Ty se pak zakreslily do pertrubačního grafu, konkrétně do osy x, který ukazuje jejich efekt na drsnost povrchu [13]. Hodnoty provozních parametrů převedené na faktory jsou v Tabulka 5.

Tabulka 5 Hodnoty faktorů zkoumaných provozních parametrů pro radiální soustružení AWJ [13]

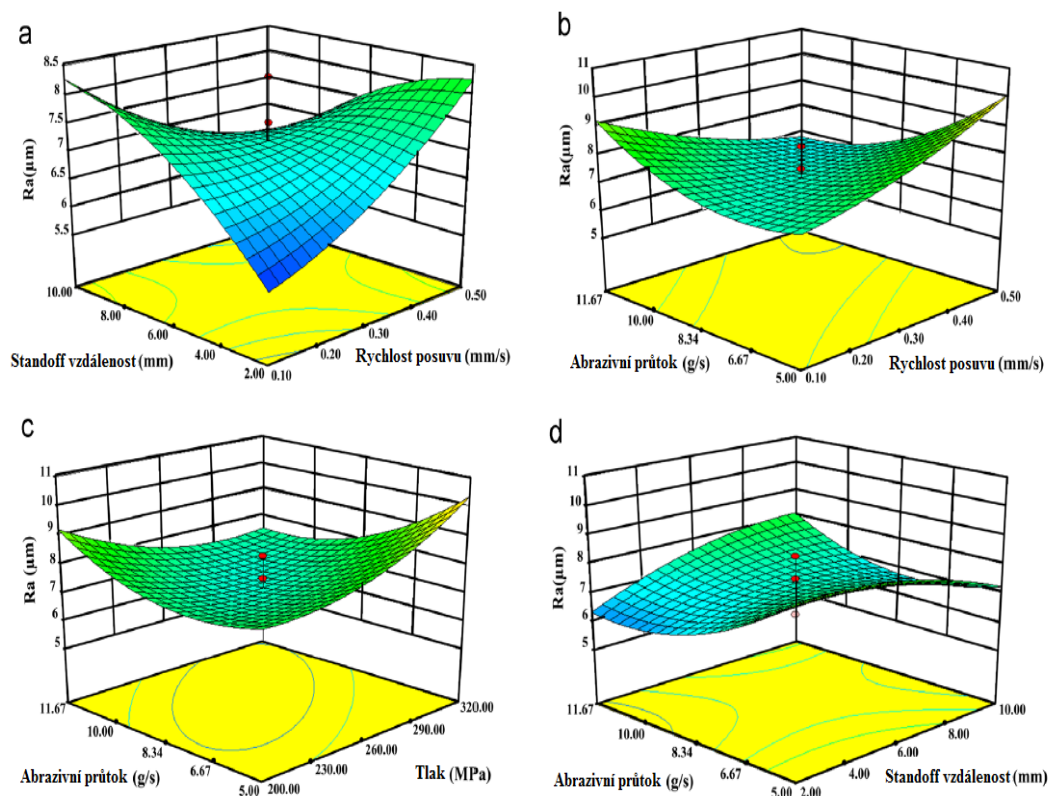
Nezávislé proměnné	Úroveň faktoru		
	-1	0	1
A:Posuvová rychlost (mm/s)	0,1	0,3	0,5
B:Tlak (MPa)	200	260	320
C:Vzdálenost standoff (mm)	2	6	10
D:Úhel nastavení (°)	60	75	90
E:Obvodová rychlost (m/s)	2	5	8
F:Abrazivní průtok (g/s)	5	8,34	11,67

Dle vytvořených pertrubačních grafů Obr. 14 lze vidět přímý vliv parametrů na Ra. Hlavní parametr pro Ra je obvodová rychlost. Ra se lineárně snižuje při zvyšování obvodové rychlosti. Lze to vysvětlit tím, že při vyšší obvodové rychlosti se rychleji odvádějí třísky. Tudíž nižší hodnota Ra byla dosažena při vyšších hodnotách obvodové rychlosti. Ra zpočátku klesá s vyšší hodnotou abrazivního průtoku. Nicméně s dalším zvyšováním se Ra zvyšuje. Ra zpočátku klesá se zvyšováním tlaku. S vyšší hodnotou tlaku se zvyšuje efektivní průměr paprsku, protože přesah většího paprsku produkuje hladší povrch než menší paprsek. Nicméně Ra se dramaticky zvyšuje při dalším zvyšování tlaku. Z tohoto důvodu, se při dalším zvyšování hodnoty tlaku, nemá vnější okraj divergentního paprsku dostatek energie pro řezání materiálu a tím se zvýší Ra. Ačkoli posuvová rychlost a úhel nastavení paprsku jsou méně důležité faktory než ostatní, musí mít optimální hodnotu pro dodržení minimální hodnoty Ra [13].



Obr. 14 Přímý efekt provozních parametrů na drsnost povrchu [13]

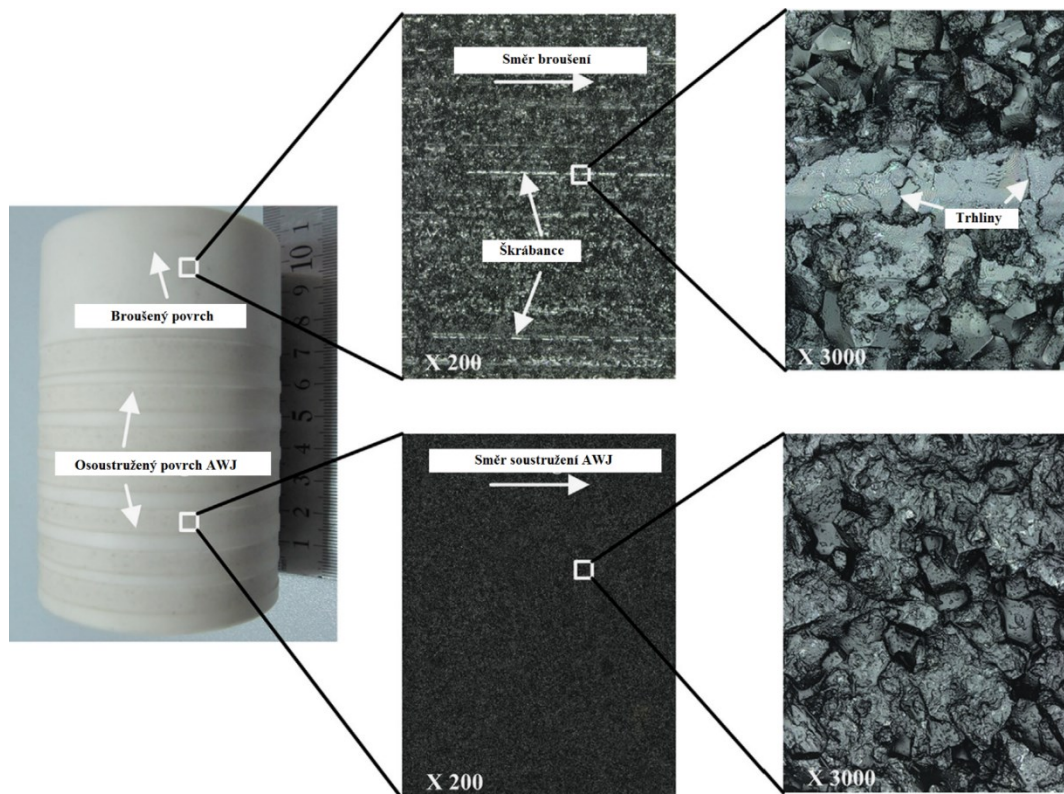
Dále práce vyšetřila vzájemný efekt na drsnost povrchu Ra . Jak ukazuje Obr. 15(a) lepšího povrchu bylo dosaženo při nižší hodnotě posuvové rychlosti v kombinaci s nejnižší hodnotou vzdálenosti standoff. Ačkoli posuvová rychlost a vzdálenost standoff mají nízký vliv na Ra , jejich vzájemný efekt je velmi důležitý. Obr. 15(b) ukazuje, že nejlepší povrch byl vytvořen při nejvyšších hodnotách posuvové rychlosti v kombinaci s nejvyšším abrazivním průtokem. Obr. 15(c) ukazuje, že lepšího povrchu bylo dosaženo, když je hodnota tlaku a abrazivního průtoku okolo střední hodnoty jejich experimentálního rozsahu. To koresponduje s faktem, že druhořadé efekty tlaku a průtoku paprsku jsou nejdůležitější mezi druhořadými efekty. Obr. 15 (d) ukazuje, že lepšího povrchu je dosaženo při nejnižší hodnotě vzdálenosti standoff s kombinací nejvyššího abrazivního průtoku. Vzdálenost standoff a tlak mají opačný efekt na Ra . Může to být přisuzováno zvyšování vzdálenosti standoff, podobně jako v případě nižšího tlaku [13].



Obr. 15 3D grafy dvojice vzájemných efektů na drsnost povrchu [13]

Daná publikace také poukázala, že nejlepší drsnosti povrchu dosáhneme při vyšší hodnotě obvodové rychlosti, díky lepšímu odvodu třísek. Pro zbytek parametrů je potřeba určit optimální hodnoty. Nejlepšího povrchu bylo dosaženo při středních experimentálních hodnotách tlaku a abrazivního průtoku. Vzájemný efekt mezi posuvovou rychlostí a abrazivním průtokem má velký vliv na drsnost povrchu. Ve studii byla nejnižší dosažená drsnost povrchu $5,3 \mu\text{m}$, což je hodnota vyšší jak u tangenciálního souběžného soustružení AWJ. Radiální režim soustružení je proto v dosavadní formě méně vhodný a je poměrně těžší predikovat hloubku řezu kvůli normálovému působení paprsku. Další úsilí je identifikovat základní mechanismus pro R_a a hloubku řezu při AW radiální soustružení a detailně vymodelovat jejich vytvářecí proces a vytvořit model predikující přesný průměr.

Nakonec již zmíněné práce byla porovnána topografie povrchu osoustruženého metodou AWJ a broušeného povrchu. Nastávalo menší šíření trhlin než při broušení [13]. Rozdíl mezi povrchem osoustruženého a broušeného povrchu lze vidět na Obr. 16.



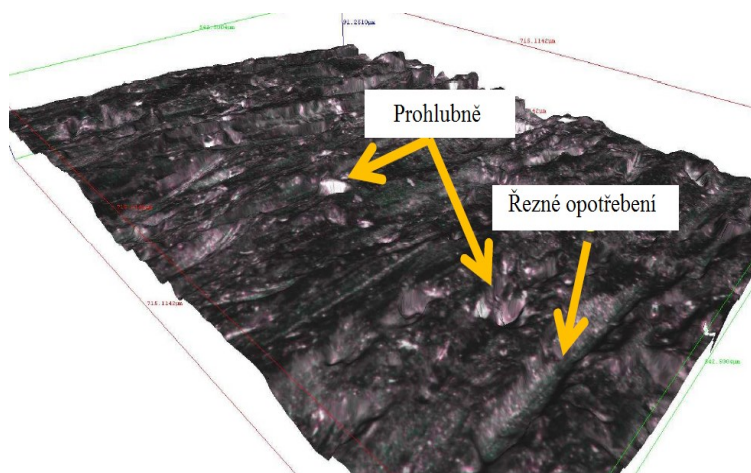
Obr. 16 Porovnání broušeného a osoustruženého povrchu [13]

Efekt provozních podmínek tangenciálního souběžného režimu soustružení byl vyšetřen v [25]. Vliv hlavních operačních parametrů byl zkoumán statisticky a byl sestaven regresní model pro drsnost povrchu. Přesnost modelu byla ověřena posouzením s experimentálními výsledky. Jako materiál byla použita hliníková slitina [25]. Nastavení faktorů pro provozní podmínky je v Tabulka 6.

Tabulka 6 Hodnoty faktorů zkoumaných provozních parametrů pro tangenciální soustružení AWJ [25]

Úroveň faktorů	-2,387	-1	0	1	2,387
Tlak vody (MPa)	130	200	250	300	370
Posuv ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	0,3	3	5	7	9,8
Otáčky obrobku (min^{-1})	130	300	400	500	640
Abrazivní průtok ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	1,77	3,78	5,24	6,7	8,71
Hloubka řezu (mm)	0,6	2	3	4	5,4

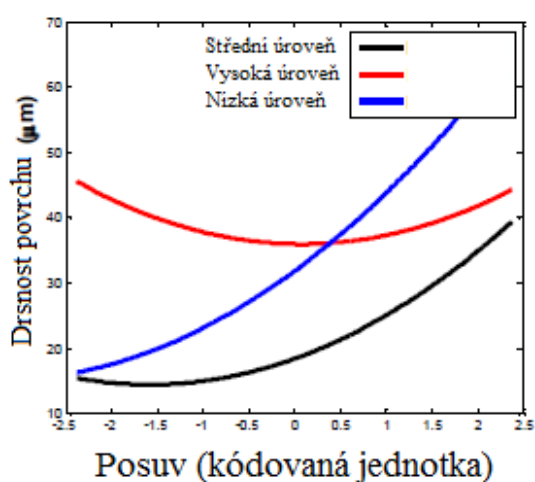
Povrch vytvořený abrazivním vodním paprskem měl charakteristický vzor. Proměnné erozní mechanismy ovlivňovaly texturu povrchu. Pro nahlédnutí do mechanismu eroze byl vytvořen snímek osoustružené součásti. Na všech úsecích povrchu bylo vidět řezné opotřebení, protože na konci obrábění je eroze uskutečněna při plytkém dopadovém úhlu. Bylo zjištěno, že všechny abrazivní částice neproudí přímo, ale některé naráží do povrchu při vyšších úhlech, což narušuje povrch mechanismem plastické deformace [25]. Snímek obrobeného povrchu dle Obr. 17.



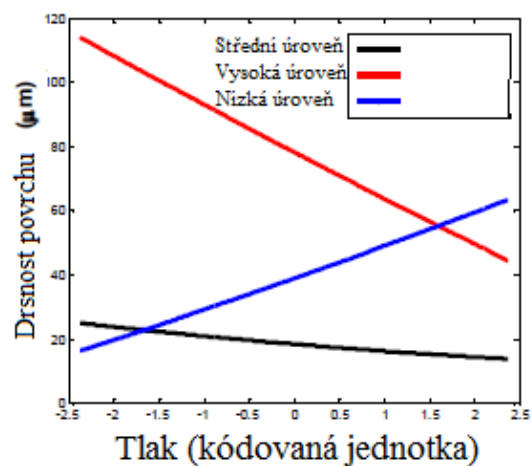
Obr. 17 Snímek povrchu osoustružené součásti [25]

Pro vliv parametrů byly vytvořeny 2D grafy, kde se měnil jeden faktor, a ostatní zůstaly konstantní. Grafy byly vytvořeny dosazováním experimentálních výsledků do regresivních modelů.

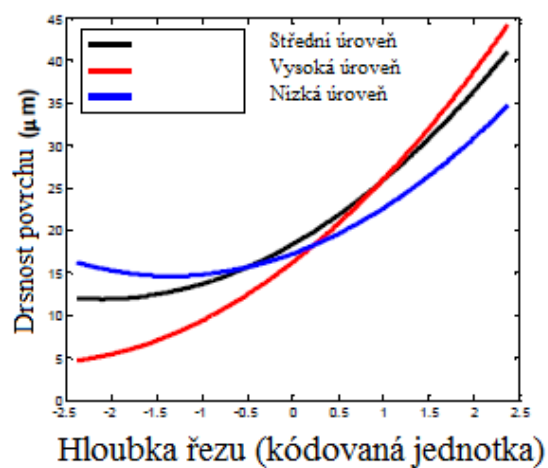
Ze zmíněných grafů se vyvodily závěry pro vliv podmínek na drsnost povrchu. Na Obr. 18, Obr. 19, Obr. 20, Obr. 21, Obr. 22 lze vidět, že abrazivní průtok, posuv a hloubka řezu mají největší vliv na drsnost povrchu. Zatímco vodní tlak a otáčky obrobku mají vliv menší. Posuv a hloubka řezu ukazují stejné tendence, přičemž nejlepší dosažená drsnost povrchu je dosažitelná při jejich nízkých úrovních. Abrazivní průtok má potenciál pro optimalizaci, zatímco nejlepší drsnost povrchu dosahuje na střední úrovni. Nejnižší dosažitelná drsnost povrchu nastává při snižování posuvu a hloubky řezu a zvyšování vodního tlaku a abrazivního průtoku [25].



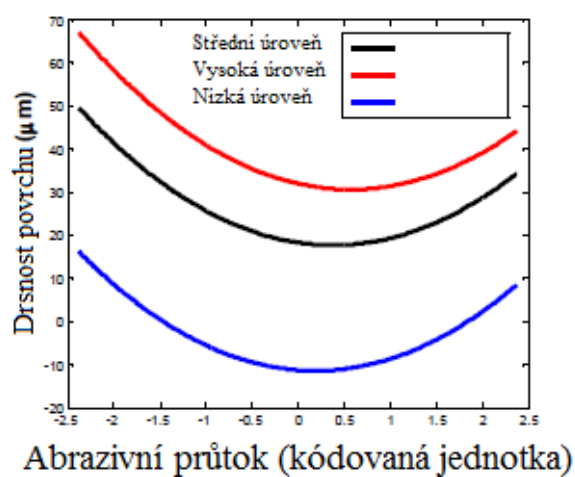
Obr. 18 Efekt posuvové rychlosti na drsnost povrchu [25]



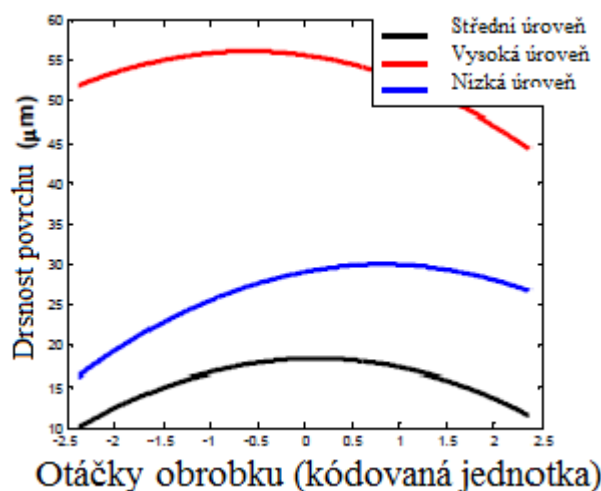
Obr. 19 Efekt tlaku na drsnost povrchu [25]



Obr. 20 Efekt hloubky řezu na drsnost povrchu [25]



Obr. 21 Efekt abrazivního průtoku na hloubku řezu [25]



Obr. 22 Efekt otáček obrobku na drsnost povrchu [25]

Pomocí sestaveného regresního modelu je možné optimalizovat proces soustružení. Bylo zjištěno, že nejlepšího povrchu dosáhneme při menších úrovních posuvové rychlosti a hloubky řezu, což odpovídá většině předchozích zdrojů. Nejlepší drsnosti povrchu nastala při optimální hodnotě abrazivního průtoku. Pomocí dané metody lze tuto optimální hodnotu nalézt. Dále se drsnost snižovala při zvyšování tlaku a abrazivního průtoku. Je otázkou o jaké množství se může abrazivní průtok zvýšit, aniž by paprsek nepřehlcoval a nezpomaloval. Bylo by vhodné, aby se v dalších studiích zaměřovalo na zvyšování vodního tlaku a jeho vlivu na drsnost povrchu, protože z této optimalizace je zřejmé, že se drsnost s vyšším tlakem snižuje lineárně. Dále by se měl vyšetřit vliv abrazivního průtoku spolu s vyšším tlakem.

1.8.1 Závěrečné zhodnocení vyhodnocených prací

Konečnou topografii povrchu ovlivňuje mnoho faktorů. Autoři se studiem těchto faktorů zabývali a vytvářejí závěry. Díky jejich výzkumům bylo potvrzeno, že efektivnější je souběžné tangenciální soustružení, jelikož dosahuje nejlepších drsností a kruhovitostí obrobku v porovnání s protiběžným soustružením. Dále bylo dokázáno, že radiálním soustružením se dosahuje horších drsností než při tangenciálním souběžném soustružení. Proto se zaměříme na závěrečné zhodnocení vlivu faktorů, ovlivňující topografii povrchu tangenciálního souběžného soustružení abrazivním vodním paprsek.

Vliv posuvu na konečnou topografii povrchu je zřejmý. Vyhodnocením regresního modelu při obrábění slitiny hliníku a měřením drsnosti povrchu niklové slitiny se ukázalo, že při zvyšující se hodnotě posuvové rychlosti se zvyšuje i drsnost povrchu. Při obrábění titanu se ale tento fakt neprojevil a nejlepší drsnost povrchu byla dosažena na určité

optimální hodnotě. Je možnost, že vliv posuvové rychlosti na drsnost povrchu je ovlivněn druhem obráběného materiálu, nebo jsou provedena nedostatečně objektivní měření drsnosti povrchu. Při zvyšování posuvové rychlosti se zvyšuje průměr obrobku, což indikuje, že paprsek nemá dostatečnou energii pro úběr materiálu. Toto může nastat z důvodu odrazení paprsku od stěn neobrobeného materiálu.

Vliv tlaku vody byl vyšetřen regresním modelem a ukázal, že při zvyšování tlaku se snižuje hodnota drsnosti. Tento fakt by mohl umocňovat i větší abrazivní průtok.

Abrazivní průtok ovlivňuje drsnost povrchu nejvíce při nízkých nebo vysokých hodnotách, ale nejlepší drsnosti povrchu je dosaženo při jeho optimální hodnotě.

Vzdálenost zdvihu neboli offsetová vzdálenost ovlivňuje drsnost tím způsobem, že při její vysoké hodnotě paprsek ztrácí energii a rozptyluje se. Tento jev zvyšuje hodnotu drsnosti, proto je nutné zmenšovat tuto vzdálenost.

Vliv otáček obrobku na drsnost povrchu byl vyšetřen pro dvě hliníkové slitiny. V první práci se hodnota drsnosti snižovala s nižší hodnotou drsnosti. V druhé práci, byla hodnota drsnosti při menších otáčkách nižší, ale při vyšších otáčkách hodnota drsnosti klesala. Je možné, že vyšší otáčky s kombinací vyššího tlaku by mohli dosahovat lepší drsnosti povrchu.

Se zvyšující se hloubkou řezu se snižuje drsnost povrchu a zhoršuje se kruhovitost.

Dopadový úhel nebyl zkoumán v žádné dostupné publikaci, ale lze usuzovat, že při nižších úhlech lze dosáhnout lepší topografie povrchu. Důvod je, že při radiálním soustružení byly dosaženy horší hodnoty drsnosti povrchu, zatímco při tangenciálním lepší. Díky tomu můžeme usuzovat, že pro vyšší úběr materiálu lze použít radiální soustružení a pro dokončovací soustružení tangenciální.

Průměr zaostřující trubice je další faktor ovlivňující drsnost povrchu. Při větším průměru zaostřující trubice se projevil příznivý vliv na kruhovitost, při obrábění měkčích materiálu byl tento vliv malý. Při obrábění houževnatého materiálu byl vliv markantní. Vliv na drsnost povrchu se s jistotou usoudit nedal. Navíc s větším průměrem zaostřující trubice se do paprsku dostane více abraziva a tím pádem má větší energii.

Mezi dalšími vlastnostmi ovlivňující drsnost povrchu jsou vlastnosti materiálu. Houževnatější materiály jsou hůře obrobitelné a vykazují jiné hodnoty drsnosti pro různé faktory. Dále je možné, že i tvorba třísky ovlivňuje výsledný proces.

Ukázalo se, že tvar a velikost abraziva má také vliv na konečnou drsnost povrchu. Je možné, že při menším použití abrazivních zrn se dosáhne lepšího povrchu.

Mezi další faktory ovlivňující drsnost povrchu patří počet přechodů, průměr vodní trysky a rotace abraziva [10]. Tyto faktory v diplomové práci vyšetřovány nebyly.

V dalších studiích by se mělo zaměřit na vliv těchto faktorů na obrábění materiálů s různými vlastnostmi, měnit tyto faktory a sledovat jejich vliv na konečnou topografii povrchu. Dále je potřeba zkoumat tyto faktory regresivními modely a optimalizovat je. Dalším problémem je nedostatečná tuhost strojních zařízení, z důvodu použití nekonvenčních přípravků, problém s trajektorií paprsku.

Studium abrazivního vodního paprsku stěžuje fakt, že některé práce jsou dostupné pouze za finanční obnos.

2 Definování nedostatků a návrh řešení problému

V současné době je soustružení těžkoobrobitelných materiálů prováděno konvenčními metodami, které nejsou efektivní a ekonomické, proto je snaha je nahradit efektivnějšími způsoby obrábění. Jednou z těchto způsobů je soustružení abrazivním vodním paprskem. Tato metoda zatím nedosahuje přesností, které jsou potřebné pro výrobu strojních součástí, proto je snaha o optimalizaci tohoto procesu.

Práce se snaží analyzovat všechny dostupné informace pro optimalizaci tohoto procesu. Dále je proveden experiment, který testuje vliv různých hodnot posuvové rychlosti na drsnost a izotropii povrchu. Výsledky budou nápomocné pro optimalizaci obráběcího procesu a napomůžou zavedení této nekonvenční metody do běžné praxe.

3 Experimentální metodika a experimentální ověřování

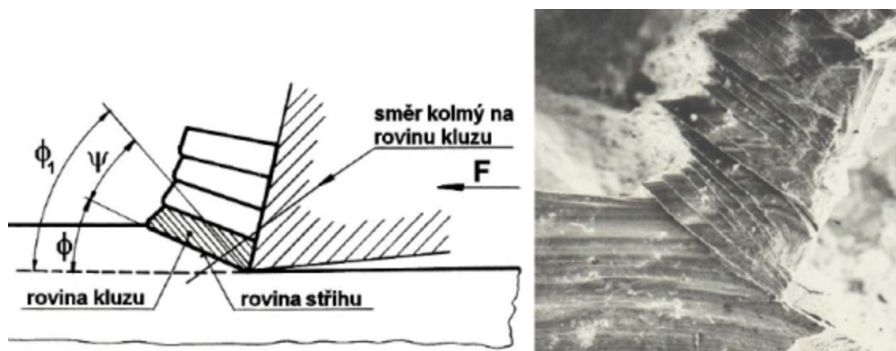
3.1 Vlastnosti a obrobitelnost titanu

Obrábění vysokopevných materiálů se speciálními vlastnostmi je aktuální téma výzkumů z pohledu volby technologie, trvanlivosti nástroje, nastavení technologických faktorů a řešení ekonomičnosti výroby [15]. Touto problematikou se zabývalo hodně autorů a některé z prací byly použity i v této práci.

Vlastnosti titanu jsou vysoká pevnost v tahu, vysoká mez kluzu, nízká měrná hmotnost, vysoký poměr pevnosti k hustotě, vynikající korozní odolnost, dobrá schopnost útlumu energie rázu a výborné únavové vlastnosti. Nevýhodami jsou vysoká cena materiálu, nižší modul pružnosti v porovnání s oceli [18].

Titanové slitiny se používají zejména v leteckém průmyslu. Významnou úlohu má u raketových a kosmických technik, kde musí odolávat prudkým změnám teploty a absolutnímu vakuu. Díky jeho odolnosti proti slané vodě je také vhodnou volbou pro stavbu lodí a ponorek. Další z jeho vlastností je odolnost proti kyselinám, což mu umožňuje další aplikace v chemickém, automobilovém průmyslu nebo v lékařství a energetice [15].

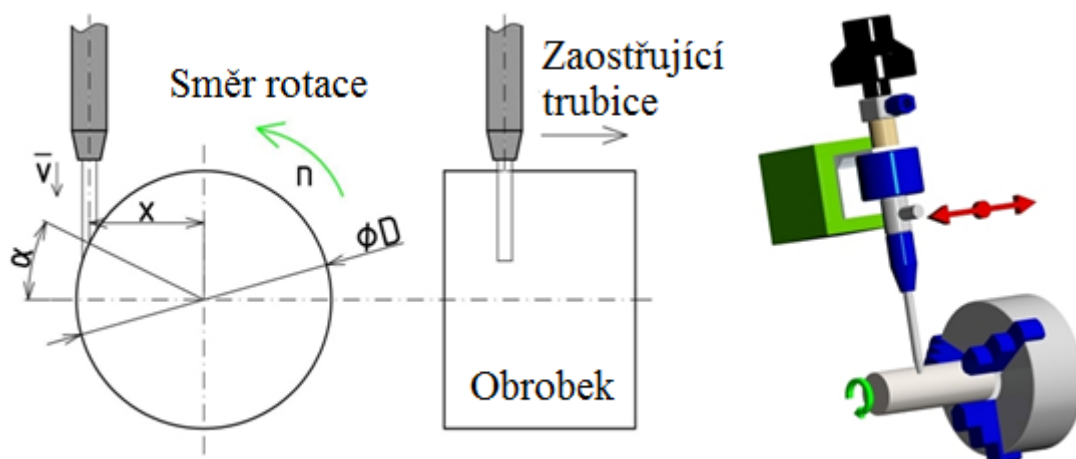
Titan a jeho slitiny se klasifikují jako těžkoobrobitelné materiály. Soustružení titanu konvenčními technologiemi způsobuje specifickou tvorbu třísky. Tříska není celistvá, ale segmentovaná. Tvorba segmentů způsobuje vysoký koeficient tření mezi čelem nástroje a třískou. Ta neodchází po čele nástroje, ale vrství se na sebe. Tvorba segmentů způsobuje nerovnoměrné plastické deformace a tím i vibrace stroje. Stejně tak špatná tepelná vodivost titanu způsobuje koncentrace tepla na hrotě nástroje, což má za následek velkou intenzitu opotřebení nástroje [15]. Příklad segmentace třísky lze vidět na Obr. 23.



Obr. 23 Segmentace třísky [11]

3.2 Materiál a metodika soustružení

Experimentální část se zabývala soustružením titanu grade 3. Pro experiment byl použit obrobek z titanu grade 3 o průměru 46 mm. Do vysokorychlostního kontinuálního paprsku byly přidány částice australského granátu o zrnitosti 80 MESH. Samotný proces soustružení probíhal na zařízení pro konvenční dělení plošných materiálů s využitím 2D X-y řezného stolu PTV WJ2020-2Z-1xPJ. Pro rotaci obrobku bylo použito přídavné zařízení, složené s pneumatického sklíčidla firmy Festo a elektromotoru pro zajištění požadovaných otáček sklíčidla. Otáčky obrobku byly nastaveny na hodnotu $n = 34 \text{ min}^{-1}$. Požadovaný tlak byl vygenerován pomocí pumpy PTV 75-60 s dvěma multiplikátory (operační tlak $40 \div 415 \text{ MPa}$, maximální průtok $7,8 \text{ l.min}^{-1}$ při tlaku 415 MPa). Experiment byl zrealizovaný na stroji Institute of Geonics of the Academy Of sciences of the Czech republic. Hodnoty posuvu v_f mm.min^{-1} se zvyšovaly z hodnot 1,5 na hodnotu 7,5 mm.min^{-1} . Realizace nastavení tangenciálního soustružení lze vidět na Obr. 24.



Obr. 24 Schématické nastavení zaostřující trubice vůči obrobku a směr posuvu

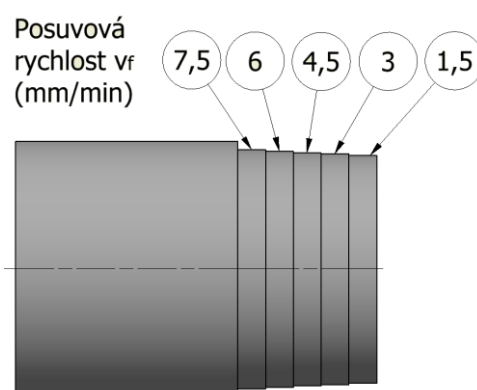
Tabulka 7 Chemické složení titanu grade 3 [19]

Prvky	%
C	<i>Max 0,1</i>
Fe	<i>Max 0,3</i>
H	<i>Max 0,015</i>
N	<i>Max 0,05</i>
O	<i>Max 0,35</i>
Ti	<i>99,1</i>

Experimentální podmínky jsou popsány v Tabulka 8.

Tabulka 8 Experimentální podmínky

Provozní podmínky	Jednotka	Hodnota
Vodní tlak [MPa]	P	400
Průměr otvoru [mm]	d_o	0,33
Průměr zaostřovací trubice [mm]	d_f	1,02
Hloubka řezu [mm]	a_p	2
Vzdálenost standoff [mm]	z	10
Abrazivní průtok [$\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$]	m_a	0,4



Obr. 25 Oblasti posuvové rychlosti

Úběr materiálu byl realizován jako mikroerozní proces užívající abrazivní částice obsažené ve vodě o velké rychlosti (1000 m.s^{-1}) a rotaci povrchu obrobku [14]. Obrábění titanu Obr. 26.



Obr. 26 Soustružení titanu abrazivním vodním paprskem [15]

4 Diskuse a konfrontace výsledků se stávající literaturou

4.1 Měření topografie povrchu

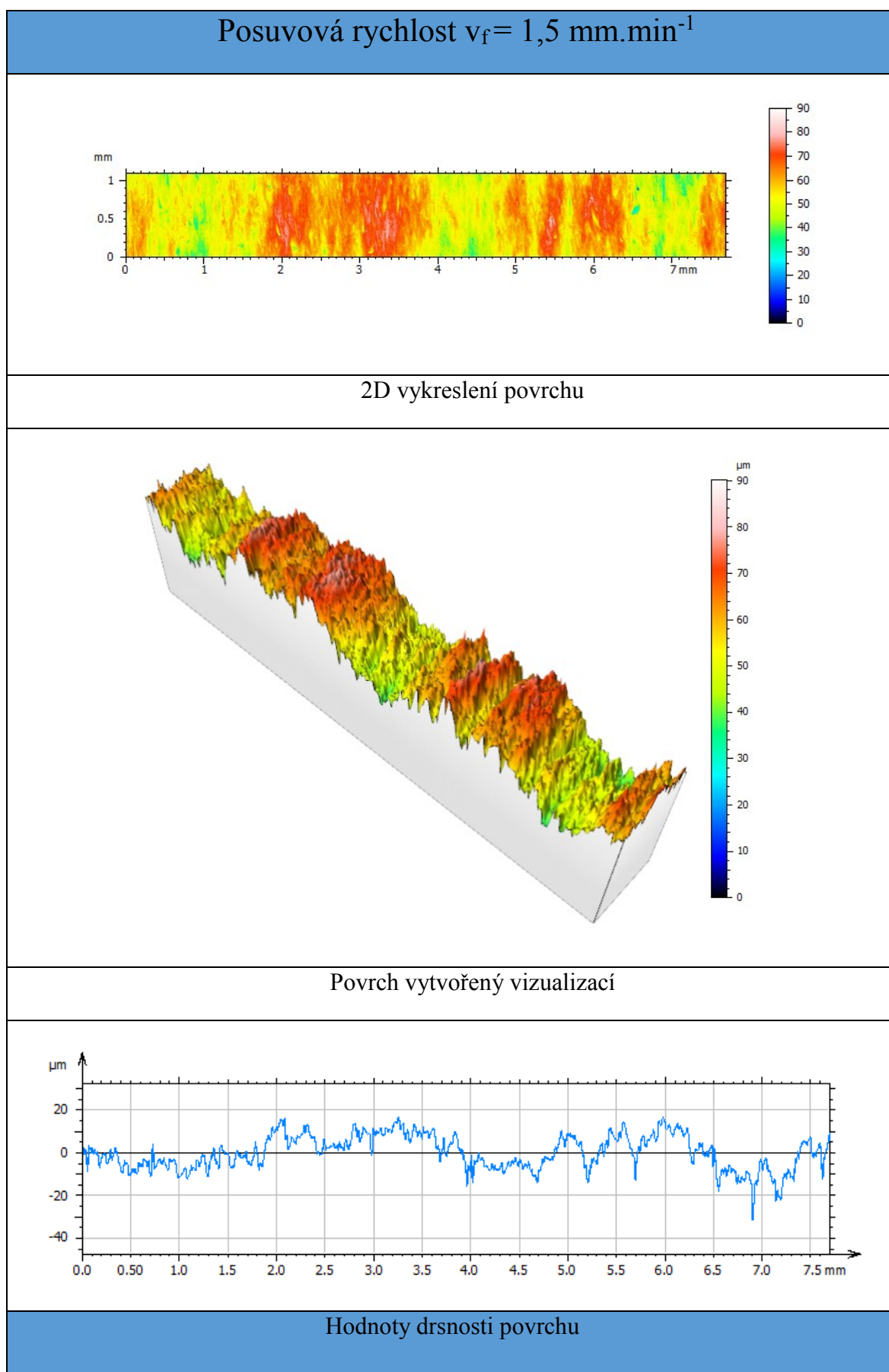
Drsnost povrchu vytvořena kontinuálním vodním paprskem byla měřena optickým profilometrem MicroProf FRT. Senzor SEN 00 03 byl použit v Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i, Ostrava Poruba. 3D plocha povrchu byla sestavena z linek s vertikálním rozlišením $4\text{ }\mu\text{m}$, přesnost $1\text{ }\mu\text{m}$, linearita 0,1 %, boční rozlišení $5\text{ }\mu\text{m}$, počet měřících stop byl 1111.

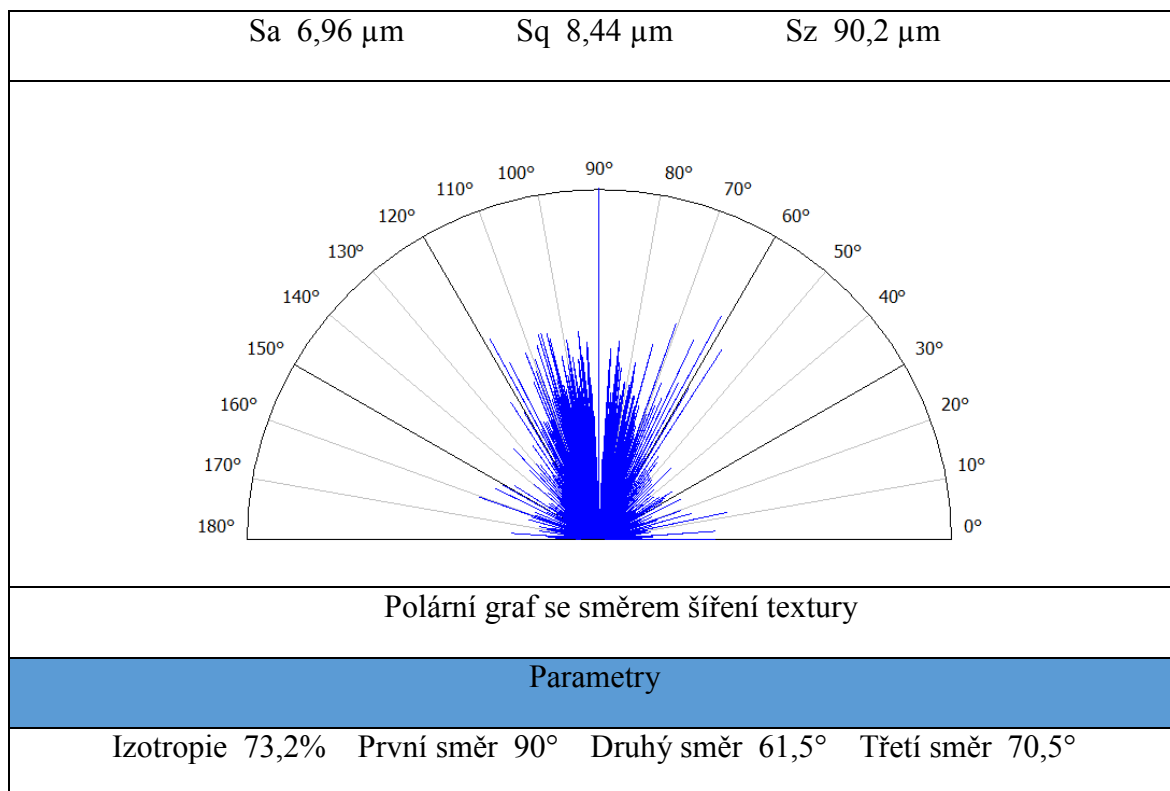
Tabulka 9 Měřicí podmínky

Forma odběru	Line
Odřezek pro filtr zvuku	$25\text{ }\mu\text{m}$
ISO 25178	
Odřezek pro vlnovou	$2,5\text{ mm}$
Počet odřezků	1
Měřená délka	$2,5\text{ mm}$

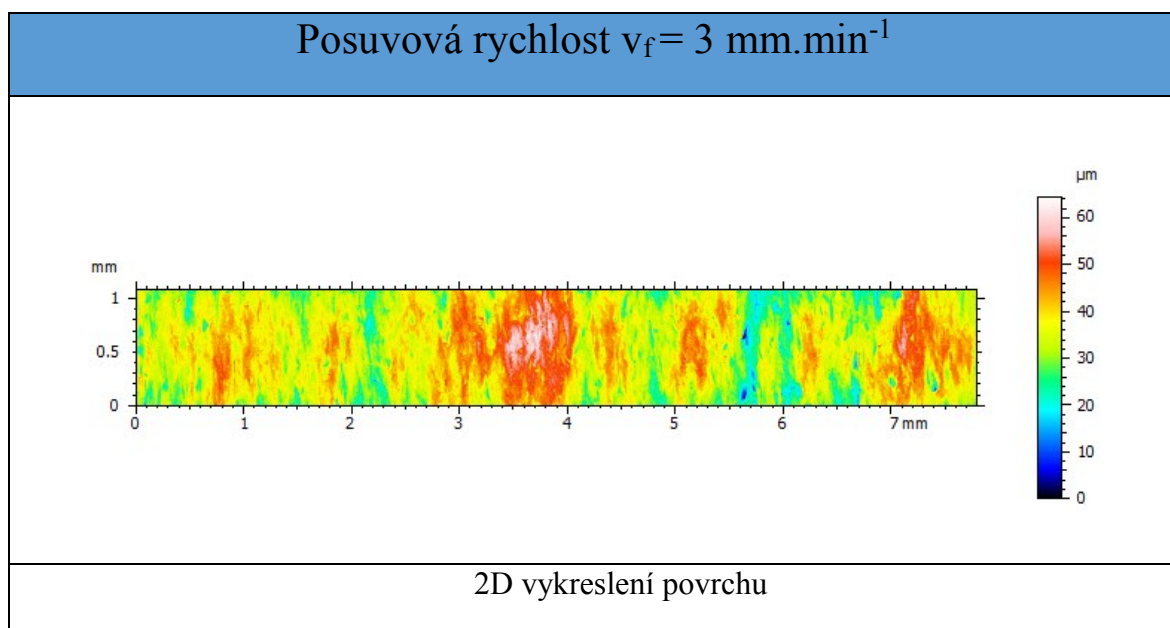
Použitý optický profilometr MicroProf FRT vytvořil 3D vizualizaci obrobeného povrchu obrobku posuvovou rychlosti $v_f = 1,5; 3; 4,5; 6; 7,5\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Vyhodnocení topografie povrchu lze vidět v Tabulce 10, Tabulce 11, Tabulce 12, Tabulce 13, Tabulce 14.

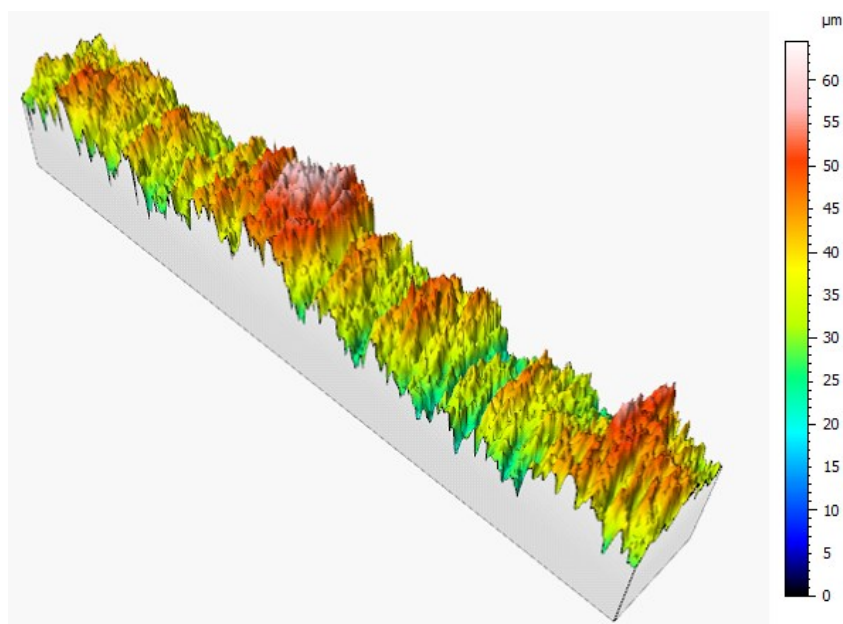
Tabulka 10 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 1,5 mm.min⁻¹



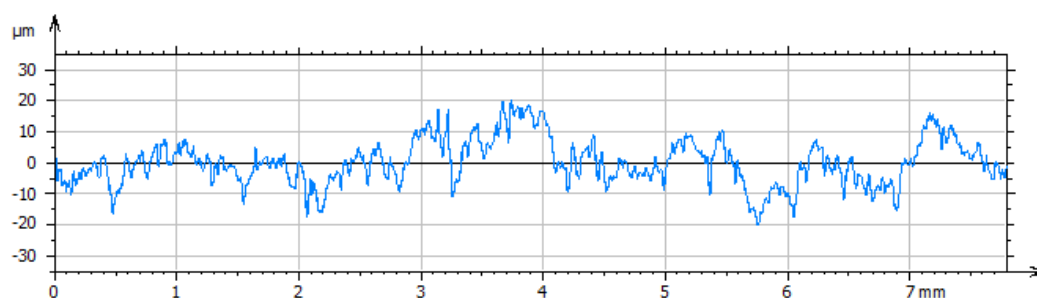


Tabulka 11 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 3 mm.min⁻¹





Povrch vytvořený vizualizací

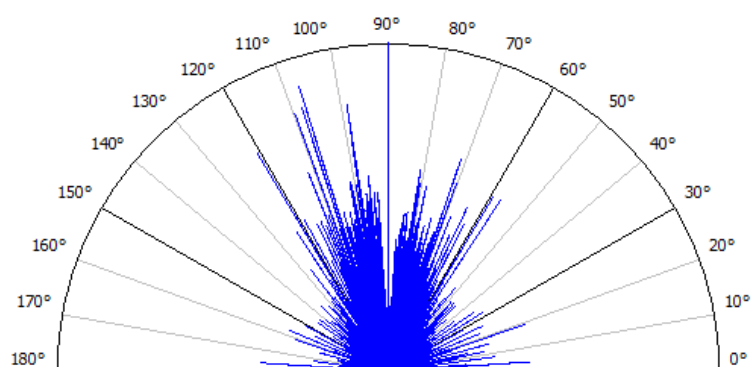


Hodnoty drsnosti povrchu

Sa 5,97 μm

Sq 7,57 μm

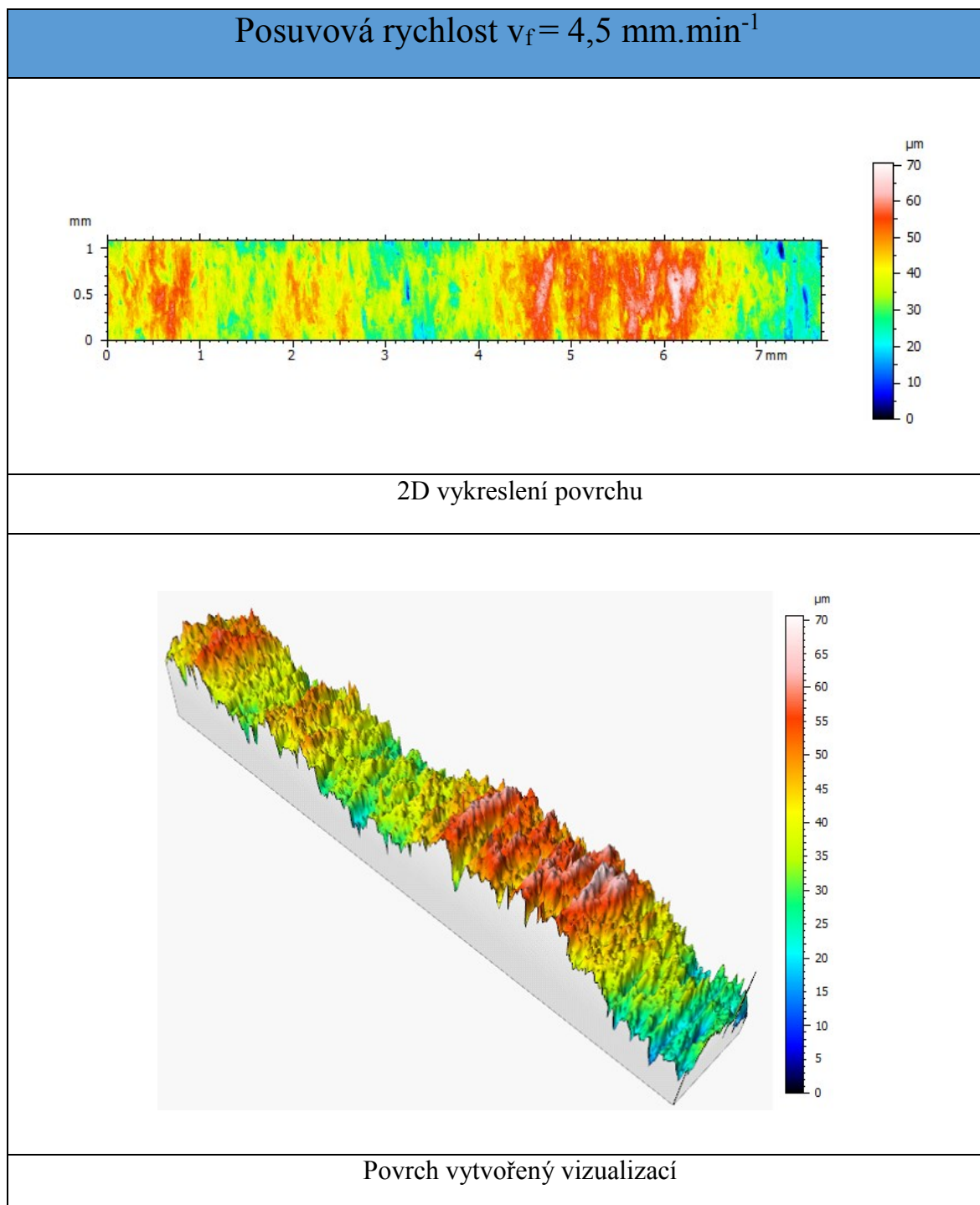
Sz 64,5 μm

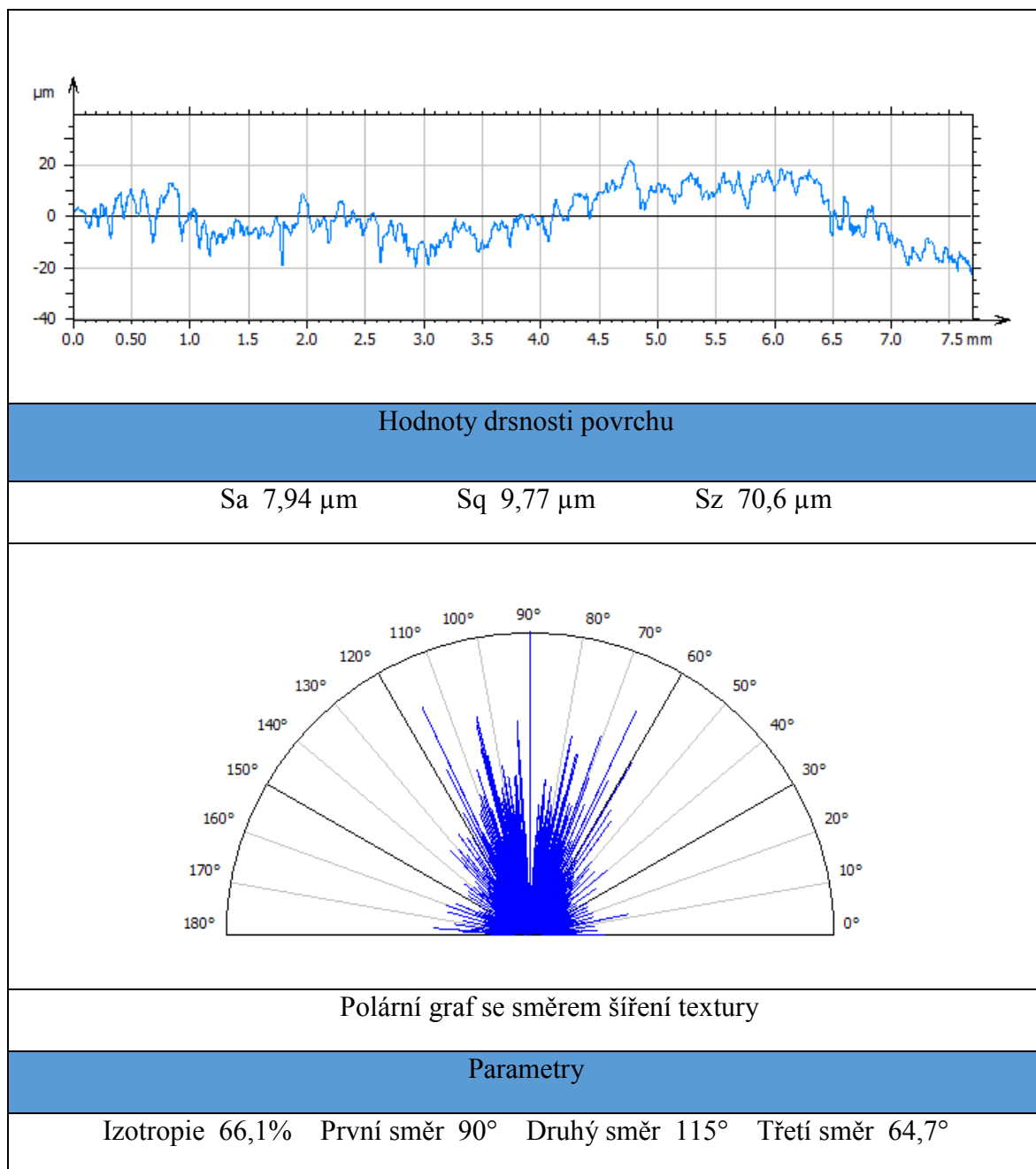


Polární graf se směrem šíření textury

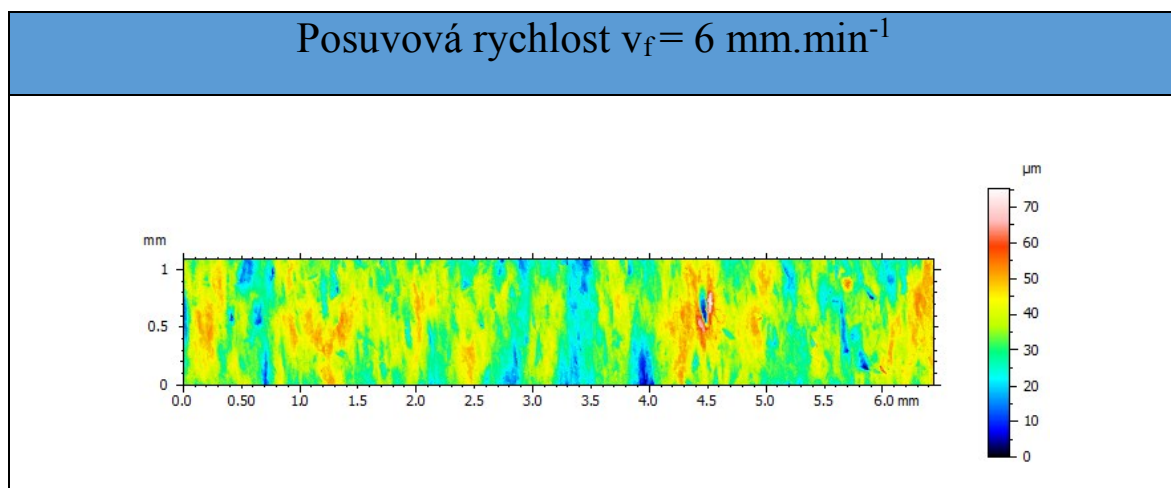
Parametry				
Izotropie	70,8%	První směr	90°	Druhý směr 107° Třetí směr 98,8°

Tabulka 12 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 4,5 mm.min⁻¹

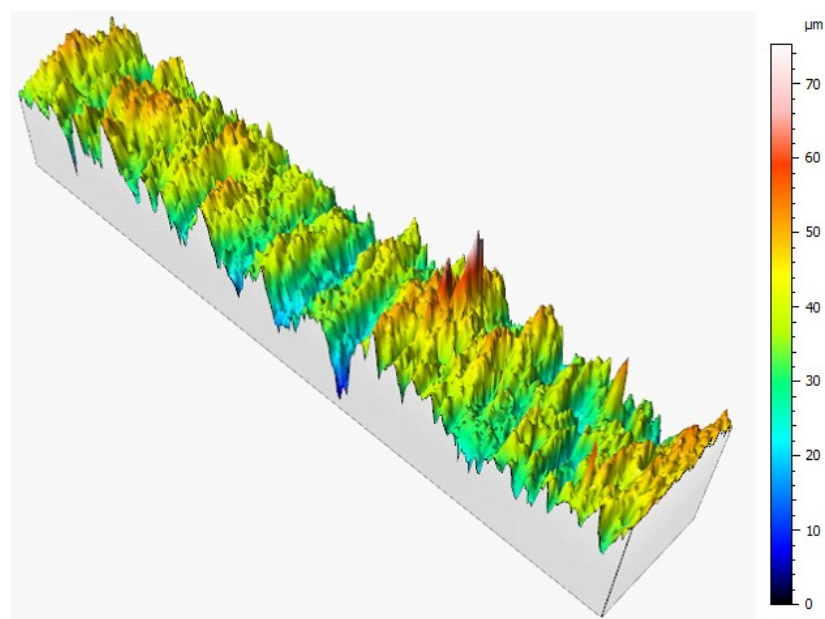




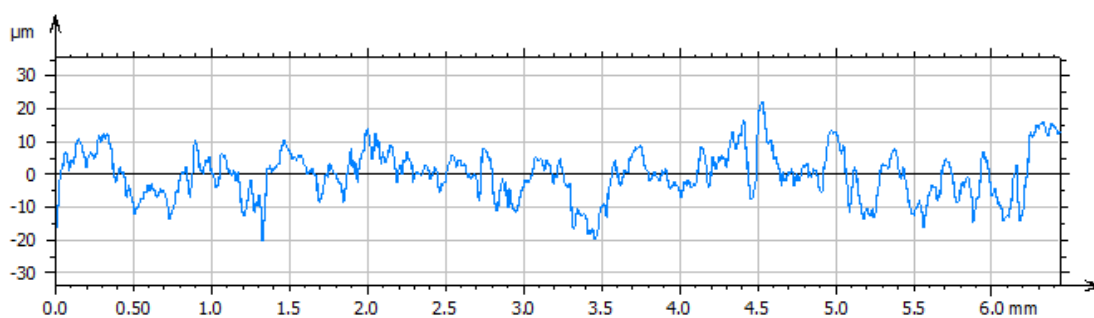
Tabulka 13 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 6 mm.min⁻¹



2D vykreslení povrchu



Povrch vytvořený vizualizací

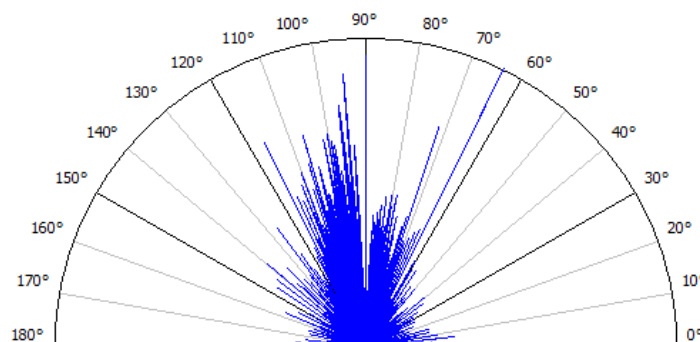


Hodnoty drsnosti povrchu

Sa 6,33 μm

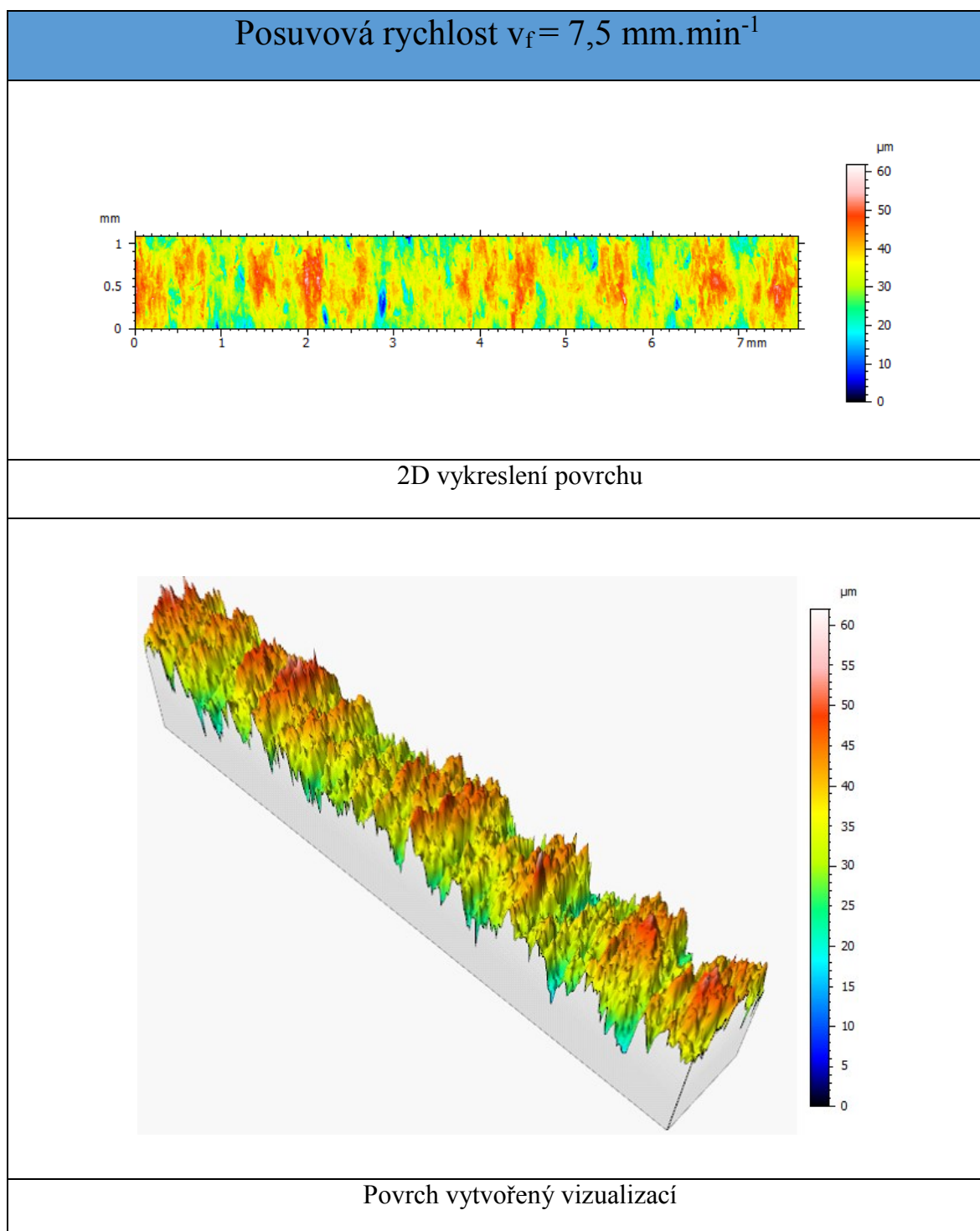
Sq 8,04 μm

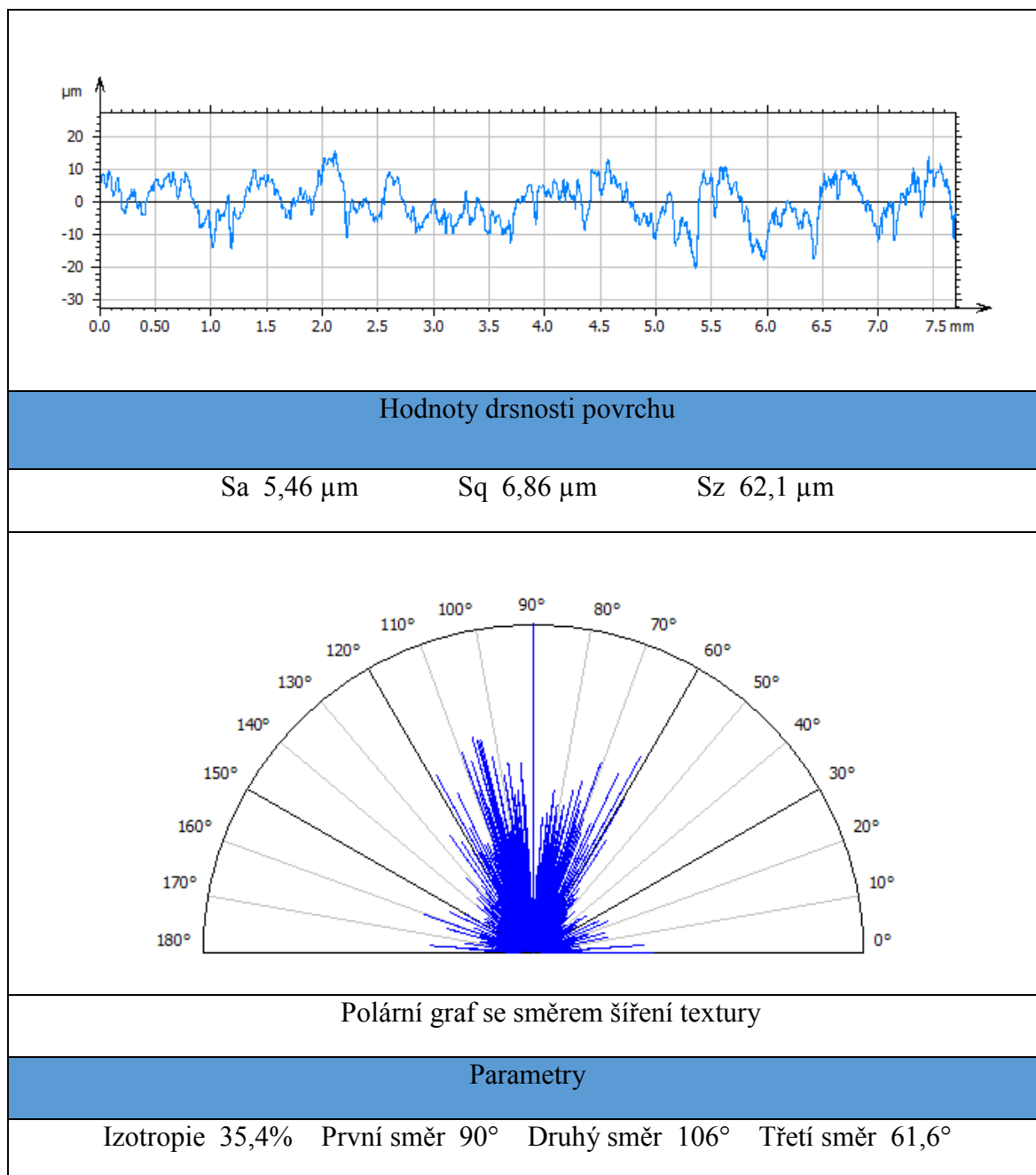
Sz 75,4 μm



Polární graf se směrem šíření textury				
Parametry				
Izotropie	29,2%	První směr	63,7°	Druhý směr 90° Třetí směr 96,4°

Tabulka 14 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 7,5 mm.min⁻¹





4.2 Diskuze nad výsledky a srovnání s jinými pracemi

První měření bylo provedeno při rychlosti posuvu $1,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Toto měření bylo provedeno na délce 7,7 mm. Bylo zjištěno, že průměrná drsnost povrchu byla 6,96 μm . Pravidelnost v kruhovitosti nebyla vypořazována. Hodnota izotropie byla naměřena 73,2 %.

Druhé měření bylo provedeno při rychlosti posuvu $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Toto měření bylo provedeno na délce 7,8 mm. Bylo zjištěno, že průměrná drsnost povrchu byla 5,97 μm . Pravidelnost v kruhovitosti nebyla vypořazována. Hodnota izotropie byla naměřena 70,8 %.

Třetí měření bylo provedeno při rychlosti posuvu $4,5 \text{ mm.min}^{-1}$. Toto měření bylo provedeno na délce 7,7 mm. Bylo zjištěno, že průměrná drsnost povrchu byla $7,94 \text{ }\mu\text{m}$. Pravidelnost v kruhovitosti nebyla vypořizována. Hodnota izotropie byla naměřena 66,1 %.

Čtvrté měření bylo provedeno při rychlosti posuvu 6 mm.min^{-1} . Toto měření bylo provedeno na délce 6,5 mm. Bylo zjištěno, že průměrná drsnost povrchu byla $6,33 \text{ }\mu\text{m}$. Pravidelnost v kruhovitosti nebyla vypořizována. Hodnota izotropie byla naměřena 29,2 %.

Páté a poslední měření bylo provedeno při rychlosti posuvu $7,5 \text{ mm.min}^{-1}$. Toto měření bylo provedeno na délce 7,7 mm. Bylo zjištěno, že průměrná drsnost povrchu byla $5,46 \text{ }\mu\text{m}$. Pravidelnost v kruhovitosti nebyla vypořizována. Hodnota izotropie byla naměřena 35,4 %.

Vliv posuvové rychlosti na drsnost posuvu je zřejmý. Jakým způsobem se ale drsnost posuvu mění nelze definovat. Nejnížší hodnoty drsnosti povrchu bylo dosaženo při nejvyšší rychlosti posuvu $7,5 \text{ mm.min}^{-1}$. Druhé nejnížší hodnoty drsnosti bylo dosaženo při rychlosti posuvu 3 mm.min^{-1} . Nejhorší drsnosti bylo dosaženo při rychlosti $4,5 \text{ mm.min}^{-1}$. Rozdíl mezi nejhorší a nejlepší dosažené drsnosti je zhruba $2,5 \text{ }\mu\text{m}$.

Hodnota izotropie se zvyšováním posuvové mění. Hodnoty posuvu $1,5$; 3 ; $4,5 \text{ mm.min}^{-1}$ vykazují vysokou míru izotropie, zatímco hodnoty posuvu 6 ; $7,5 \text{ mm.min}^{-1}$ vykazují střední hodnotu izotropie. Při nižších posuvových rychlostech $1,5$; 3 ; $4,5 \text{ mm.min}^{-1}$ vykazuje izotropie podobné vlastnosti a to okolo 70 %. Při posuvové rychlosti 6 mm.min^{-1} klesá izotropie povrchu více jak dvojnásobně oproti nižší posuvové rychlosti $4,5 \text{ mm.min}^{-1}$ na zhruba 30 %. Zároveň bylo při rychlosti posuvu 6 mm.min^{-1} dosaženo nejlepší izotropie povrchu 29,2 %. Při dalším zvyšování posuvové rychlosti se izotropie zvyšovala asi o 6 %. Rozdíl mezi izotropií nejnížší posuvové rychlosti a nejvyšší posuvové rychlosti je více jak dvojnásobný.

Toto tvrzení nám potvrzuje předchozí studium obrábění titanu [15] při různých posuvových rychlostech. Rychlost posuvu sice měnila drsnost povrchu, ale nejnížší hodnoty povrchu bylo dosaženo při určité ideální hodnotě. Tento fakt odporuje tvrzení, že při zvyšující se posuvové rychlosti se zvyšuje drsnost povrchu. Ačkoliv tento fakt platil u obrábění hliníkových a niklových slitin [5], [25] nemusí tak nutně platit u všech druhů materiálů. Otázkou zůstává, jak na tyto ideální hodnoty posuvové rychlosti přijít.

Soustružení abrazivním vodním paprskem patří mezi vhodné metody pro obrábění titanových slitin, ale je potřeba dále optimalizovat tento proces, aby mohl být použit pro hrubovací operace. V této práci bylo zjištěno, že za nejvyššího posuvu je možné dosahovat drsnosti titanového rotačního obrobku $5,46 \text{ }\mu\text{m}$. Tato drsnost je dostačující

pro hrubovací operace, ale je problém s predikcí finálního průměru obrobku, jelikož se při jiných posuvových rychlostech mění [5], [15].

Izotropie je vlastnost, kdy má povrch stejné charakteristiky bez ohledu na směr, ve kterém je zkoumán. V průmyslu se setkáváme s velkým množstvím periodických orientovaných ploch (vzniklé obráběním, broušením apod.), které jsou tzv. anizotropní. Izotropie povrchů může být stanovena a kvantifikována na základě Fourierovy transformace a autokorelační funkce.

Hodnota izotropie může být velmi nápomocná hodnota pro vytváření povrchu, zvyšování kvality, funkce a životnosti strojních částí používaných v průmyslu. Díky podrobné analýze směru povrchu můžeme zvýšit životnost strojních částí a zvýšit odolnost proti opotřebení pro prevenci poruch strojních součástí [16].

V dalších výzkumech je potřeba vyvinout model pro predikci finálního průměru při měnících se provozních parametrech. Pro vznik tohoto modelu je potřeba zkoumat vliv parametrů pro různé druhy materiálů, studovat mechanismus úběru, tvoření povrchu a odražení paprsku při měnících se úhlech dopadu. Je nutné tyto provozní parametry optimalizovat tak, aby se dosahovalo nejlepšího povrchu a nejvyššího úběru materiálu. Pro lepší efektivitu těchto výzkumu je vhodné použít regresních modelů. Stroje pro výzkumné účely nejsou konvenční, takže mají nízkou tuhost a nižší přesnost. Tím pádem se snižuje přesnost trajektorií paprsků, které ovlivňují konečný průměr. Tento problém je také potřeba vyřešit, aby se dalo souběžné tangenciální soustružení abrazivním vodním paprskem zařadit mezi hrubovací operace.

5 Nový přístup k řešeným problémům.

Soustružení těžkoobrobitelných materiálů je v současnosti řešeno konvenčními metodami. Soustružení abrazivním vodním paprskem je vhodnou metodou pro obrábění hůře zpracovatelných materiálů. Tato metoda umožňuje obrábění bez tepelně ovlivněné oblasti a bez velkých řezných sil. Jelikož jde o relativně novou metodu, výzkum se zaměřuje o optimalizaci toho procesu.

Pro zefektivnění procesu je nutné testovat různé druhy materiálů při měnících se provozních podmínkách, studovat topografii obrobeného materiálu a činit závěry, které budou napomáhat k optimalizaci. Výhodnou metodou pro tuto optimalizaci je statická analýza pomocí regresních modelů ověřená experimenty. Touto cestou je pak možné zjišťovat vliv provozních podmínek na kvalitu procesu a poté je vhodnou funkcí optimalizovat. Optimalizace by také mohla probíhat díky statistickému plánování při co nejmenším počtu experimentů, což je nejefektivnější a nejekonomičtější způsob.

6 Závěr

Tato diplomová práce se skládá z teoretické a experimentální části.

V úvodu teoretické části byl shrnut současný stav obrábění a materiálů a cíle práce. Dále byl stanoven vhodný způsob pro obrábění materiálů se speciálními vlastnostmi, a to obrábění abrazivním vodním paprskem, konkrétně soustružení AWJ. Popsán byl druh použitého vodního paprsku v experimentu, systém vytváření vodního paprsku, princip zaostřovací trubice, druh a principy režimu soustružení abrazivním vodním paprskem, generátory tlaku, faktory působící v procesu a mechanismus úběru.

V další části teorie byly rozebírány dostupné práce autorů, kteří se zabývali problematikou abrazivního vodního paprsku. Jeden úsek byl věnován úběru materiálu a jeho optimalizací, druhý a hlavní úsek se zabýval topografií povrchu a její optimalizací. Z těchto prací byli učiněny závěry a byly určeny směry dalšího výzkumu.

V experimentální části se obráběl těžkoobrobitelný titan grade 3. Obrábění probíhalo při měnící se rychlosti posuvu $v_f = 1,5; 3, 4,5; 6; 7,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Ostatní podmínky byly konstantní. Proběhlo také vyhodnocení topografie povrchu a učinily se závěry.

Bylo zjištěno, že posuvová rychlost ovlivňuje hodnotu drsnosti povrchu. Nebylo zjištěno jakou tendencí. Nejlepšího dosaženého povrchu bylo dosaženo při optimální hodnotě posuvové rychlosti, a to $7,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. V dalším výzkumu je snaha o nalezení této optimální hodnoty. Dále byla vyhodnocena izotropie povrchu, která se se zvyšováním posuvu převážně snižovala. Z tohoto důvodu lze říci, že nejlepšího povrchu můžeme dosáhnout při nejvyšší hodnotě posuvové rychlosti.

Chtěl bych poděkovat mým rodičům za veškerou podporu, kterou mi dali. Dále bych rád poděkoval Sergeji Hlochovi za cenné rady nejen k diplomové práci.

7 Seznam použité literatury

- [1] Alcom Alval - řezání vodním paprskem. *Alcom Alval - řezání vodním paprskem* [online]. 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.vodnipaprsek.com/clanky/o-vodnim-paprsku.html>
- [2] ALI, Yasser M. a Jun WANG. Impact Abrasive Machining. *Machining with Abrasives* [online]. Boston, MA: Springer US, 2011, s. 385 [cit. 2016-04-05]. DOI: 10.1007/978-1-4419-7302-3_9. ISBN 978-1-4419-7301-6. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-7302-3_9
- [3] ANSARI, A. I. a HASHISH, M. On the modeling of abrasive waterjet turning. In: *Proceedings of 11th International Conference on Jet Cutting Technology*, St. Andrews, Scotland, September 8–10, 1992, pp. 555–576.
- [4] AXINTE, A.D., STEPANIAN, P.J., KONG, C.M. a MCGOURLAY, J. Abrasive waterjet turning – An efficient method to profile and dress grinding wheels. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 49, Issues 3-4, March 2009, Pages 351-356.
- [5] CÁRACH, Ján, Sergej HLOCH, Petr HLAVÁČEK, et al. Tangential turning of Incoloy alloy 925 using abrasive water jet technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, **82**(9-12), 1747-1752 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1007/s00170-015-7489-0. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-7489-0>
- [6] CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOCKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Abrasive Water Jet Turning. In: LEHOCKÁ, D., CÁRACH, J., KNAPČÍKOVÁ, L. a HLOCH, S., eds. *TEAM 2013 Proceedings: 5th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society: (Technique, Education, Agriculture and Menegement)*. Slavonski Brod, Croatia: TEAM Society, 2013. Prešov 4th-6th November 2013. Dostupné z: http://www.teamsociety.eu/team_conferences/team_2013/default.aspx. ISSN 1847- 9065.
- [7] HLAVÁČEK, Petr, Ján CÁRACH, Sergej HLOCH, Karol VASILKO, Dagmar KLICHOVÁ, Jiří KLICH a Dominika LEHOCKÁ. Sandstone Turning by Abrasive Waterjet. *Rock Mechanics and Rock Engineering* [online]. 2015, **48**(6), 2489-2493 [cit.

2016-04-16]. DOI: 10.1007/s00603-015-0719-9. ISSN 0723-2632. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00603-015-0719-9>.

[8] HLOCH, S., VALÍČEK, J. *Influence of Factors on Surface Topography Created by Abrasive Water Jet Cutting*, Faculty of manufacturing technologies of Technical university of Košice with a seat in Prešov, Prešov, 2008, ISBN: 978-80-553-0091-7.

[9] HLOCH, S., VALÍČEK, J., HREHA, P., BEDNÁR, S., PERŽEL, V. a LATOVÁ, A. *Online-identification Hydroabrasive separation using acoustic emission and vibration*, Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach so sídlom v Prešove, Prešov, 2011, ISBN: 978-80-553-0698-8.

[10] HLOCH, Sergej a Jan VALÍČEK. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*. Prešov. 1: Sergej Hloch, 2008. ISBN 978-80-553-0091-7.

[11] HUMÁR, A. Technologie I. Výpočtová cvičení. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno, 2003. Brno: Vysoké učení technické v Brně VACEK, Pavel. *Analýza faktorů hydroabrazivního soustružení niklových superslitin* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2016-04-11] Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Sergej Hloch Dostupné z: <http://theses.cz/id/9apzbg/>.

[12] CHAMRAD, Jakub. *POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPEREM A LASEREM* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/32292>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Piška.

[13] LIU, Dun, Chuanzhen HUANG, Jun WANG, Hongtao ZHU, Peng YAO a ZengWen LIU. Modeling and optimization of operating parameters for abrasive waterjet turning alumina ceramics using response surface methodology combined with Box–Behnken design. *Ceramics International* [online]. 2014, **40**(6), 7899-7908 [cit. 2016-04-11]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.12.137. ISSN 02728842. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884213017537>.

[14] MANU, R. a N. Ramesh BABU. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials. *Wear* [online]. 2009, **266**(11-12), 1091-1097 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/j.wear.2009.02.008. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164809000684>

- [15] *Metalurgija: časopis Fakulteta, instituta i željezare Sisak* [online]. Sisak [Croatia]: Centar za informiranje željezare Sisak [cit. 2016-04-16]. ISBN 0543-5846.
- [16] METELKOVÁ, J. Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2014.
- [17] UHLMANN, Eckart, Karsten FLÖGEL, Michael KRETZSCHMAR a Fabian FALTIN. Abrasive Waterjet Turning of High Performance Materials. *Procedia CIRP* [online]. 2012, **1**, 409-413 [cit. 2016-04-18]. DOI: 10.1016/j.procir.2012.04.073. ISSN 22128271. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827112000741>
- [18] REICHMAN, L. Využití slitin titanu v cyklistickém průmyslu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [19] *Sandvik* [online]. 2016 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://smt.sandvik.com/en/materials-center/material-datasheets/tube-and-pipe-seamless/sandvik-ti-grade-3>
- [20] ŤAVODOVÁ, M. The quality of the cut surface after abrasive water jet cutting. In: *Acta facultatis Technicae Zvolen- Slovakia*. 2011 [Online]. Dostupné z: http://www.tuzvo.sk/files/FEVT/fakulta_fevt/tavodova-akta-fevt-2-2011-4.pdf [Accessed: 27-Sep-2013].
- [21] VACEK, Pavel. <i>Analýza faktorů hydroabrazivního soustružení niklových superslitin</i> [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2016-04-11]. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Sergej Hloch Dostupné z: <http://theses.cz/id/9apzbg/>>.
- [22] *Vodní paprsek .. - výzkum, vývoj, aplikace: sborník přednášek konference o technologii vodního paprsku = Water Jet .. - Research, Development, Applications : proceedings of the conference on water jetting technology*. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., 2009
- [23] ZOHOURKARI, I., M. ZOHOOR a M. ANNONI. Investigation of the Effects of Machining Parameters on Material Removal Rate in Abrasive Waterjet Turning. *Advances in Mechanical Engineering*[online]. 2014, **6**, 624203-624203 [cit. 2016-04-17]. DOI: 10.1155/2014/624203. ISSN 1687-8132. Dostupné z: <http://ade.sagepub.com/lookup/doi/10.1155/2014/624203>.

[24] ZOHOURKARI, I. a ZOHOOR, M. An Eerosion-based Modeling of Abrasive Waterjet Turning. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology 38 2010*. [Online]. Dostupné z: <http://www.waset.org/journals/waset/v38/v38-65.pdf>. [Accessed: 27-Sep-2013].

[25] ZOHOURKARI, Iman, Mehdi ZOHOOR a Massimiliano ANNONI. Surface Waviness in Abrasive Waterjet Offset-Mode Turning. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2014, **599-601**, 555-559 [cit. 2016-04-19]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.555. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.599-601.555>

8 Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení vodního paprsku [9]	11
Obr. 2 Širší rozdělení vodního paprsku [21]	11
Obr. 3 Schéma tvorby abrazivního vodního paprsku [12]	12
Obr. 4 Schéma řezné hlavice, princip přeměny vysokotlakého paprsku na vysokorychlostní [10]	13
Obr. 5 Dopadový úhel pro tangenciální režim souběžného soustružení abrazivním vodním paprskem [14]	14
Obr. 6 Souběžné tangenciální soustružení [7]	15
Obr. 7 Konvenční protiběžné soustružení [7]	15
Obr. 8 Radiální soustružení [13]	16
Obr. 9 Kontakt abrazivní částice s obrobkem [6]	18
Obr. 10 Drsnost povrchu při hodnotě posuvu $v_f = 1,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. 1 Řezné stopy zanechané abrazivními zrny. 2 Nepravidelná ovální prohlubeň orientována ve směru řezné stopy [5]	22
Obr. 11 Drsnost povrchu při hodnotě posuvu $v_f = 9 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. 1 Dlouhá řezná stopa zanechaná abrazivními zrny. 2 Nepravidelná ovální prohlubeň orientována ve směru řezné stopy [5]	23
Obr. 12 Graf hodnot drsnosti povrchu, úběru materiálu a kruhovitosti [17]	24
Obr. 13 Zpevnění povrchu při AWJ soustružení v porovnání s konvenčním [17]	25
Obr. 14 Přímý efekt provozních parametrů na drsnost povrchu [13]	29
Obr. 15 3D grafy dvojice vzájemných efektů na drsnost povrchu [13]	30
Obr. 16 Porovnání broušeného a osoustruženého povrchu [13]	31
Obr. 17 Snímek povrchu osoustružené součásti [25]	33
Obr. 18 Efekt posuvové rychlosti na drsnost povrchu [25]	33
Obr. 19 Efekt tlaku na drsnost povrchu [25]	34
Obr. 20 Efekt hloubky řezu na drsnost povrchu [25]	34
Obr. 21 Efekt abrazivního průtoku na hloubku řezu [25]	34
Obr. 22 Efekt otáček obrobku na drsnost povrchu [25]	35
Obr. 23 Segmentace třísky [11]	39
Obr. 24 Schématické natavení zaostřující trubice vůči obrobku a směr posuvu	40
Obr. 25 Oblasti posuvové rychlosti	41
Obr. 26 Soustružení titanu abrazivním vodním paprskem [15]	42

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnota dosažených drsností a průměrů pro titanovou slitinu [15]	21
Tabulka 2 Hodnota dosažených drsností a průměrů pro inconel 925	22
Tabulka 3 Hodnota dosažených drsností a průměrů pro grafit [22]	26
Tabulka 4 Hodnota dosažených drsností a průměrů pro hliníkovou slitinu [22]	27
Tabulka 5 Hodnoty faktorů zkoumaných provozních parametrů pro radiální soustružení AWJ [13]	28
Tabulka 6 Hodnoty faktorů zkoumaných provozních parametrů pro tangenciální soustružení AWJ [25]	32
Tabulka 7 Chemické složení titanu grade 3 [19]	41
Tabulka 8 Experimentální podmínky	41
Tabulka 9 Měřicí podmínky	43
Tabulka 10 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 1,5 mm.min ⁻¹	44
Tabulka 11 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 3 mm.min ⁻¹	45
Tabulka 12 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 4,5 mm.min ⁻¹	47
Tabulka 13 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 6 mm.min ⁻¹	48
Tabulka 14 Vyhodnocení topografie pro posuvovou rychlost 7,5 mm.min ⁻¹	50